



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ
ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

του

Γεωργάκη Αναστάσιου

Επιβλέπων Καθηγητής: Μπαργιώτας Δημήτριος

Αναπληρωτής Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Συνεπιβλέπων Καθηγητής: Τσουκαλάς Ελευθέριος

Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Βόλος, Οκτώβριος 2019



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ
ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

του

Γεωργάκη Αναστάσιου

Επιβλέπων Καθηγητής: Μπαργιώτας Δημήτριος

Αναπληρωτής Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Συνεπιβλέπων Καθηγητής: Τσουκαλάς Ελευθέριος

Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Βόλος, Οκτώβριος 2019



UNIVERSITY OF THESSALY

POLYTECHNIC SCHOOL

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**WIND FARM OPERATION ANALYSIS AND THE EFFECT OF
THEIR PENETRATION ON THE ELECTRICITY GRID**

Diploma Thesis

Of

Georgakis Anastasios

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

Associate Professor, University of Thessaly

Co-advisor: Tsoukalas Lefteri

Professor, University of Thessaly

Volos, October 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτριο Μπαργιώτα για την βοήθεια, την καθοδήγηση και την κατανόηση που μου έδειξε, τόσο κατά την διάρκεια των προπτυχιακών μαθημάτων του, όσο και κατά την διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κ. Ελευθέριο Τσουκαλά για την συνεργασία και την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τα αγαπημένα μου πρόσωπα, για την υποστήριξη και τις συμβουλές κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Θεό για την δύναμη και την υπομονή που μου έδωσε κατά την διάρκεια των σπουδών μου και για την βοήθεια Του στο να ολοκληρώσω επιτυχώς τις σπουδές μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αποτελεί η εκτενής ανάλυση της λειτουργίας των αιολικών πάρκων και των επιμέρους εξαρτημάτων από τα οποία αποτελούνται, καθώς επίσης και η επίδραση που έχει η διείσδυση τους στην διάρθρωση και την λειτουργία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιο αναλυτικά, η δομή της εργασίας οργανώνεται στα εξής οχτώ κεφάλαια:

Στο 1^ο Κεφάλαιο, γίνεται ιστορική αναδρομή για την εξέλιξη της χρήσης της αιολικής ενέργειας. Παρουσιάζονται οι εφαρμογές της αιολικής ενέργειας από την αρχαιότητα και την εκμετάλλευση του ανέμου μέσω των ιστιοπλοϊκών καραβιών μέχρι και την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, αναφέρεται η τεχνολογική πρόοδος στο κομμάτι της κατασκευής των ανεμογεννητριών, με ιδιαίτερη έμφαση σε γεγονότα που αποτέλεσαν ορόσημο για την μετέπειτα εξέλιξη τους.

Στο 2^ο Κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα είδη των αιολικών πάρκων, συνοδευόμενα από επιμέρους στατιστικά στοιχεία για το κάθε είδος, με ιδιαίτερη αναφορά στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους, καθώς επίσης και τα κριτήρια που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, με σκοπό την κατάλληλη επιλογή για εγκατάσταση.

Στο 3^ο Κεφάλαιο, αναλύονται οι κατηγορίες των ανεμογεννητριών. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των Ανεμογεννητριών Οριζόντιου και Κάθετου Άξονα και στην συνέχεια γίνεται μια υποκατηγοριοποίηση αυτών των δύο ειδών και περαιτέρω ανάλυση και των ειδικότερων κατηγοριών.

Στο 4^ο Κεφάλαιο, αναφέρονται διεξοδικά τα επιμέρους εξαρτήματα των ανεμογεννητριών. Αναλυτικότερα, παρουσιάζεται η λειτουργία των βασικών εξαρτημάτων τόσο στο εξωτερικό μέρος των ανεμογεννητριών όπως ο πύργος και οι λεπίδες του ρότορα, όσο και στο εσωτερικό όπως τα ηλεκτρονικά ισχύος και οι τράπεζες πυκνωτών.

Στο 5^ο Κεφάλαιο, γίνεται εκτενής ανάλυση των τεχνολογιών των γεννητριών που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες. Παρουσιάζονται οι βασικότερες κατηγορίες όπως οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, οι σύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος καθώς και οι ασύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος.

Στο 6^ο Κεφάλαιο, αναλύονται διεξοδικά οι προϋποθέσεις ενσωμάτωσης της αιολικής ενέργειας στο δίκτυο, καθώς επίσης και παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια του συστήματος. Κάποιοι από αυτούς τους παράγοντες είναι, τα χαρακτηριστικά του ανέμου και πώς αυτά επηρεάζουν την συμπεριφορά του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς επίσης και οι επιπτώσεις της ενσωμάτωσης απομονωμένων αιολικών πάρκων στο δίκτυο.

Στο 7^ο Κεφάλαιο, τονίζονται εκτενώς οι επιπτώσεις από την διείσδυση της αιολικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ο λόγος για τον οποίο υπάρχουν διακυμάνσεις στην τάση και την συχνότητα, οι επιπτώσεις στην παραγωγή εφεδρικής χωρητικότητας, στις ανάγκες αποθήκευσης της ενέργειας, καθώς και στα δίκτυα διανομής και μεταφοράς ισχύος.

Στο 8^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι οικονομικές επιπτώσεις από την διείσδυση της αιολικής ενέργειας στο δίκτυο. Αναλύονται τα πρόσθετα κόστη για τις ανάγκες του δικτύου που προκύπτουν μετά την διείσδυση της αιολικής ενέργειας, οι αγορές ενέργειας και ποια είναι τα χαρακτηριστικά τους, καθώς επίσης και το παράδειγμα της Δανίας ως χώρας με πολύ μεγάλο ποσοστό διείσδυσης αιολικής ενέργειας στο δίκτυο της.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to provide a detailed analysis of the operation of wind farms and their components, as well as their impact on the structure and operation of the electricity network.

In more detail, the structure of the work is organized into the following eight chapters:

In Chapter 1, a historical overview of the evolution of wind energy use is made. Applications of wind energy from ancient times and the exploitation of wind through sailing boats to the exploitation of wind energy for the purpose of generating electricity are presented. In addition, technological progress is reported in the field of wind turbine manufacturing, with particular emphasis on events that have been milestones for their later development.

Chapter 2 presents the types of wind farms, together with individual statistics, with particular reference to their advantages and disadvantages, as well as the criteria to be considered in order to select the right installation.

In Chapter 3, the categories of wind turbines are analyzed. In particular, the operating characteristics of the Horizontal and Vertical Shaft Wind Turbines are reported and then a subclassification of these two types is made and further analysis of the more specific categories.

In Chapter 4, the components of wind turbines are detailed. In more detail, the main components are displayed both on the outside of the wind turbines such as the tower and rotor blades, and on the inside such as power electronics and capacitor banks.

In Chapter 5, a detailed analysis of generator technologies used in wind turbines is made. The main categories such as DC generators, modern AC generators as well as asynchronous AC generators are presented.

In Chapter 6, the conditions for integrating wind energy into the grid are analyzed in detail as well as factors that play an important role in the stability of the system. Some of these factors are the characteristics of the wind and how they affect the behavior of the electricity grid, as well as the implications of integrating isolated wind farms into the grid.

In Chapter 7, the effects of wind energy penetration on the grid are extensively emphasized. Specifically, the reasons why there are variations in voltage and frequency, the impact on backup capacity generation, energy storage needs, and power distribution and transmission networks are presented.

Chapter 8 presents the economic impact of wind energy penetration on the grid. The additional costs for the grid needs arising after the wind energy penetration, the energy markets and their characteristics are analyzed, as well as Denmark's example as a country with a very high wind energy penetration.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
ABSTRACT	vii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	ix
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Αρχαιότητα	1
1.3 Ηλεκτρική Ενέργεια Παραγόμενη μέσω της Αιολικής	2
1.4 Η Μητέρα Όλων των Σύγχρονων Ανεμογεννητριών	4
1.5 Μεγάλες Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα.....	5
1.6 21 ^{ος} Αιώνας	6
1.7 Η Ανάπτυξη των Ανεμογεννητριών σε Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	8
ΧΕΡΣΑΙΑ ΚΑΙ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ	8
2.1 Εισαγωγή	8
2.2 Χερσαία Αιολικά Πάρκα	8
2.2.1 Πλεονεκτήματα	9
2.2.2 Μειονεκτήματα	9
2.2.3 Στατιστικά Στοιχεία	10
2.3 Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα	11
2.3.1 Πλεονεκτήματα	13
2.3.2 Μειονεκτήματα	14
2.3.3 Στατιστικά Στοιχεία	14
2.4 Συμπεράσματα.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	16

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ..... 16

3.1 Εισαγωγή16

3.2 Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα16

3.2.1 Κατηγοριοποίηση Ανεμογεννητριών Οριζόντιου Άξονα17

3.2.1.1 Προσήμες Ανεμογεννήτριες17

3.2.1.2 Υπήνεμες Ανεμογεννήτριες18

3.2.2 Πλεονεκτήματα19

3.2.3 Μειονεκτήματα19

3.3 Ανεμογεννήτριες Κάθετου Άξονα19

3.3.1 Κατηγοριοποίηση Ανεμογεννητριών Κάθετου Άξονα20

3.3.1.1 Ανεμογεννήτριες Darrieus20

3.3.1.2 Ανεμογεννήτριες Giromill21

3.3.2 Πλεονεκτήματα22

3.3.3 Μειονεκτήματα23

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 24

ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ 24

4.1 Εισαγωγή24

4.2 Πύργος.....25

4.3 Θάλαμος.....26

4.4 Λεπίδες του Ρότορα27

4.5 Κιβώτιο Ταχυτήτων.....27

4.6 Φρένα Ασφαλείας.....28

4.7 Έλεγχος Ισχύος.....28

4.7.1 Έλεγχος Κλίσης29

4.7.1.1 Θεωρία και Εφαρμογή29

4.7.2 Έλεγχος Καθυστέρησης.....31

4.7.2.1 Ενεργητικής Καθυστέρησης Ελεγχόμενες Ανεμογεννήτριες.....31

4.7.2.2 Παθητικής Καθυστέρησης Ελεγχόμενες Ανεμογεννήτριες.....32

4.7.3 Έλεγχος Εκτροπής32

4.8 Ηλεκτρονικά Ισχύος.....33

4.8.1 Αρμονικά Ρεύματα.....33

4.8.2	Συστήματα Σταθερής Ταχύτητας.....	34
4.8.2.1	Soft Starters.....	34
4.8.2.2	Τράπεζες Πυκνωτών.....	35
4.8.3	Συστήματα Μεταβλητής Ταχύτητας.....	36
4.8.3.1	Μετατροπείς Μερικής Ισχύος.....	36
4.8.3.2	Μετατροπείς Πλήρους Ισχύος.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5		38
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....		38
5.1	Εισαγωγή.....	38
5.2	Γεννήτριες Συνεχούς Ρεύματος.....	38
5.3	Σύγχρονες Γεννήτριες Εναλλασσόμενου Ρεύματος.....	39
5.4	Ασύγχρονες Γεννήτριες Εναλλασσόμενου Ρεύματος.....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6		48
ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ.....		48
6.1	Εισαγωγή.....	48
6.2	Διακύμανση της Αιολικής Ενέργειας.....	48
6.3	Επίδραση των Αιολικών Πηγών στην Διακύμανση της Ηλεκτρικής Ενέργειας	50
6.4	Επίδραση της Διασύνδεσης των Ανεμογεννητριών στην Διακύμανση της Αιολικής Ενέργειας	52
6.5	Επίδραση της Γεωγραφικής Κατανομής των Αιολικών Πάρκων στην Διακύμανση της Αιολικής Ενέργειας	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7		55
ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ.....		55
7.1	Εισαγωγή.....	55

7.2	Διακυμάνσεις της Συχνότητας	55
7.3	Διακυμάνσεις της Τάσης	56
7.4	Τρεμόπαιγμα της Τάσης.....	57
7.5	Ανισορροπία Φάσης της Τάσης.....	57
7.6	Απότομες Βουτιές και Άνοδοι της Τάσης	58
7.7	Αρμονικά.....	59
7.8	Επιπτώσεις της Αιολικής Ενέργειας στην Παραγωγή Εφεδρικής Χωρητικότητας	60
7.9	Επιπτώσεις της Αιολικής Ενέργειας στις Ανάγκες Αποθήκευσης της Ενέργειας	62
7.10	Επιπτώσεις της Αιολικής Ενέργειας στα Δίκτυα Μεταφοράς και Διανομής Ισχύος	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8		66
ΟΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....		66
8.1	Εισαγωγή	66
8.2	Παροχή Ισχύος με Σκοπό την Αντιμετώπιση της Διακύμανσης της Αιολικής Ενέργειας και της Εξισορρόπησης της Ζήτησης	67
8.3	Παράγοντες που Συντελούν στην Εξισορρόπηση της Προσφοράς και της Ζήτησης	68
8.4	Πρόσθετα Κόστη για τις Ανάγκες του Δικτύου	69
8.5	Αγορές Ενέργειας	70
8.6	Το Παράδειγμα της Δανίας	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9		71
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Εισαγωγή

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται από την αρχαιότητα όπου οι άνθρωποι με την βοήθεια των πανιών των πλοίων εκμεταλλεύονταν την ταχύτητα του ανέμου για να μετακινηθούν. Με την ανάπτυξη της ηλεκτρικής ενέργειας η αιολική ενέργεια βρήκε νέες εφαρμογές όπως για παράδειγμα, τον φωτισμό των κτιρίων που απέχουν από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο και τη φόρτιση μικρών μπαταριών. Κατά την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα αναπτύχθηκαν τα πρώτα μικρά αιολικά πάρκα τα οποία κάλυπταν τις ανάγκες κατοικιών και αγροκτημάτων.

Οι σημερινές ανεμογεννήτριες διαθέτουν ευρεία κλίμακα ισχύος και συντελούν από την φόρτιση των μπαταριών για απομονωμένες κατοικίες μέσω σταθμών μικρής ισχύος, μέχρι και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της τάξεως των Gigawatt, από μεγάλα υπεράκτια αιολικά πάρκα τα οποία τροφοδοτούν τα εθνικά ηλεκτρικά δίκτυα. Λόγω της αυξανόμενης τάσης για αντικατάσταση των συμβατικών μορφών ενέργειας με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, η αιολική ενέργεια αποτελεί ισχυρό πόλο έλξης για όλες τις χώρες παγκοσμίως και τις επόμενες δεκαετίες το ποσοστό της διείσδυσης της στο ηλεκτρικό δίκτυο θα είναι συνεχώς αυξανόμενο.

1.2 Αρχαιότητα

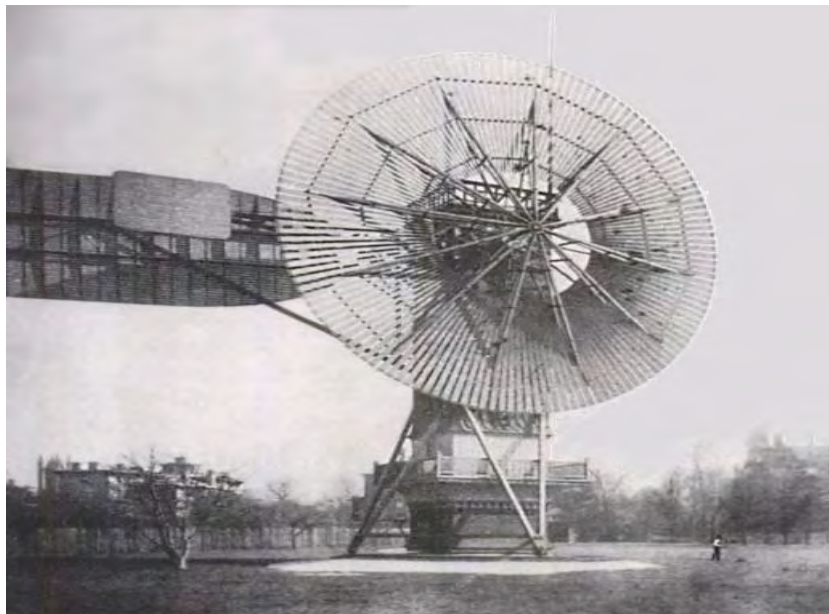
Οι πρώτες μηχανικές εφαρμογές στις οποίες έγινε χρήση του ανέμου καταγράφονται στην ιστιοπλοΐα. Υπάρχουν ενδείξεις ότι πλοία με έδρα το Δέλτα του Ευφράτη έκαναν εμπόριο κατά μήκος της ακτής, μέχρι και τη Βορειοδυτική Ινδία. Παράλληλα, τα παλαιότερα γνωστά ιστιοφόρα κατασκευάζονταν πριν από το 5000 π.Χ από καλάμια συσσωρευμένα και ραμμένα μεταξύ τους, τα οποία στην συνέχεια επικαλύπτονταν με πίσσα έτσι ώστε να παραμένουν στεγανά [\[1\]](#). Μέχρι τη ρωμαϊκή εποχή, οι Κινέζοι είχαν κατασκευάσει μεγάλα ιστιοφόρα πλοία που μπορούσαν να ταξιδεύουν με μεγάλη ασφάλεια και ταχύτητα ακόμη και σε αντίθετους ανέμους, ενώ τον 1ο αιώνα μ.Χ. στην Ρωμαϊκή Αίγυπτο, ο μηχανικός Ηρώων της

Αλεξάνδρειας δημιουργεί την πρώτη μηχανή, η τροφοδοσία της οποίας γίνεται αποκλειστικά με την χρήση ενός τροχού ο οποίος εκμεταλλεύεται την αιολική κίνηση.

1.3 Ηλεκτρική Ενέργεια Παραγόμενη μέσω της Αιολικής

Το 1821, ο Michael Faraday παρουσίασε τον πρώτο ηλεκτροκινητήρα και μετά από 10 χρόνια το πρώτο δυναμό, γεγονότα ιδιαίτερα σημαντικά διότι έδιναν πλέον την δυνατότητα στις μηχανές να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα εκμεταλλευόμενες την αιολική ενέργεια.

Η πρώτη ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος κατασκευάστηκε στη Σκωτία τον Ιούλιο το 1887 από τον καθηγητή James Blyth. Είχε ύψος 10 περίπου μέτρα και είχε χρησιμοποιηθεί για τον φωτισμό του εξοχικού του. Σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα, ο Charles Brush στις Ηνωμένες Πολιτείες παρήγαγε για πρώτη φορά ηλεκτρική ενέργεια με την χρήση του ανέμου, το χειμώνα του 1887. Η τεράστια γεννήτρια που διέθετε η ανεμογεννήτρια ([Εικόνα 1.1](#)) έδωσε στο σπίτι του την δυνατότητα να είναι πλήρως αυτόνομο για περίπου 20 χρόνια. Η ανεμογεννήτρια Brush είχε ύψος 18 μέτρων, πάνω από 100 λεπίδες και λειτουργούσε στα 12 kW.



Εικόνα 1.1: Ο ανεμόμυλος του Charles Brush το 1887, ήταν ο πρώτη ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Ο Poul La Cour ήταν επίσης δραστήριος στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας και το 1891 ορίστηκε διευθυντής ενός πειραματικού σταθμού ανεμόμυλων ([Εικόνα 1.2](#)) που ίδρυσε η δανική κυβέρνηση στο Askov [\[2\]](#). Τα αποτελέσματα της έρευνας του, παρείχαν σημαντικό θεωρητικό και πρακτικό υπόβαθρο για την μεταγενέστερη εξέλιξη της αιολικής ενέργειας στη Δανία.



Εικόνα 1.2: Ο πειραματικός σταθμός του Poul La Cour στο Askov της Δανίας το 1891.

Το 1931 εφευρέθηκε η ανεμογεννήτρια Darrieus, με τον κατακόρυφο άξονα της να παρέχει ένα διαφορετικό σχεδιασμό από τη συμβατική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα. Ο κατακόρυφος προσανατολισμός της, δεχόταν τον άνεμο από οποιαδήποτε κατεύθυνση χωρίς να χρειάζονται προσαρμογές και η γεννήτρια με τον εξοπλισμό του κιβωτίου ταχυτήτων μπορούσαν να τοποθετηθούν στο έδαφος αντί για την κορυφή του πύργου.

Το 1941 τέθηκε σε λειτουργία η πρώτη ανεμογεννήτρια μεγέθους MW ([Εικόνα 1.3](#)), στο Castleton των Ηνωμένων Πολιτειών. Αυτή η ανεμογεννήτρια της τάξης των 1,25 MW λειτούργησε για πάνω από 1000 ώρες και σταμάτησε λόγω βλάβης στα πτερύγια. Πιθανότατα δεν επισκευάστηκε ποτέ, με αποτέλεσμα να μην ξαναλειτουργήσει.



Εικόνα 1.3: Η πρώτη ανεμογεννήτρια μεγέθους Megawatt στον κόσμο, κοντά στο Castleton, ΗΠΑ.

1.4 Η Μητέρα Όλων των Σύγχρονων Ανεμογεννητριών

Το 1956, με χρηματοδότηση από το αμερικανικό σχέδιο Marshall για μεταπολεμική ανασυγκρότηση, ο Johannes Juul, πρώην μαθητής του Poul La Cour, κατασκεύασε μια μηχανή 200 KW, διαμέτρου 24 μέτρων για την εταιρεία ηλεκτρισμού SEAS στο Gedser ([Εικόνα 1.4](#)), στη νοτιοανατολική ακτή της Δανίας [1]. Αυτό το μηχάνημα διέθετε έναν ρότορα με τρία πετρύγια τα οποία ήταν ενισχυμένα με δομικά υλικά αεροσκάφους. Η συγκεκριμένη γεννήτρια θεωρήθηκε πρωτοπόρος και οδήγησε σε ραγδαία ανάπτυξη την βιομηχανία των ανεμογεννητριών στην Δανία, η οποία αργότερα εξελίχθηκε σε μια από τις μεγαλύτερες παγκοσμίως. Όλες οι δανικές ανεμογεννήτριες λόγω της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας είχαν τρία πετρύγια στον σχεδιασμό τους, ο οποίος υιοθετήθηκε από τα περισσότερα κράτη στον κόσμο με αποτέλεσμα οι Δανοί να την ονομάζουν ως "Τη μητέρα όλων των σύγχρονων ανεμογεννητριών".



Εικόνα 1.4: Η μηχανή Gedser γνωστή και ως η μητέρα όλων των σύγχρονων ανεμογεννητριών.

Ήταν προσήνεμη, με μήκος 24m και χωρητικότητα της τάξεως των 200KW. Λειτουργούσε αξιόπιστα από το 1956 και για περίπου 10 χρόνια, όταν και η πτώση των τιμών του πετρελαίου και του άνθρακα, άνοιγαν τον δρόμο για επένδυση στις συμβατικές μορφές ενέργειας, καθώς τα έξοδα επισκευής και συντήρησης ήταν υπερβολικά μεγάλα και η συνέχιση της λειτουργίας της κρίθηκε ζημιογόνα. Υπήρξε ανενεργή για μερικά χρόνια αλλά μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973, η NASA χρηματοδότησε την επανέναρξη της λειτουργίας της.

1.5 Μεγάλες Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα

Οι Ian Mays και Sir Robert McAlpine κατασκεύασαν μια ανεμογεννήτρια χωρητικότητας 130KW και διαμέτρου 25m, την VAWT25, στην Εθνική Τοποθεσία Δοκιμών της CEGB στο Carmarthen Bay, Μεγάλη Βρετανία, το 1986. Στη συνέχεια, εξέλιξαν το αρχικό τους μοντέλο

με αποτέλεσμα να κατασκευάσουν μια νέα ανεμογεννήτρια χωρητικότητας 500KW και διαμέτρου 35m, την VAWT50, στον ίδιο χώρο δοκιμών στα μέσα του 1990.

Η τεράστια αλλαγή ωστόσο πραγματοποιήθηκε το 1978, όταν και κατασκευάστηκε η πρώτη ανεμογεννήτρια πολλών MW στον κόσμο. Η μονάδα παραγωγής ενέργειας ήταν ικανή να παράγει 2MW, ενώ αποτελούνταν από τρεις λεπίδες και ο πύργος της είχε σωληνοειδή μορφή. Κατασκευάστηκε από τους δασκάλους και τους μαθητές του σχολείου Tvinnd [\[3\]](#) και εξακολουθεί να λειτουργεί ακόμη και σήμερα, ενώ αξίζει να επισημανθεί η ιδιαίτερη ομοιότητα της με τις ανεμογεννήτριες της σημερινής γενιάς.

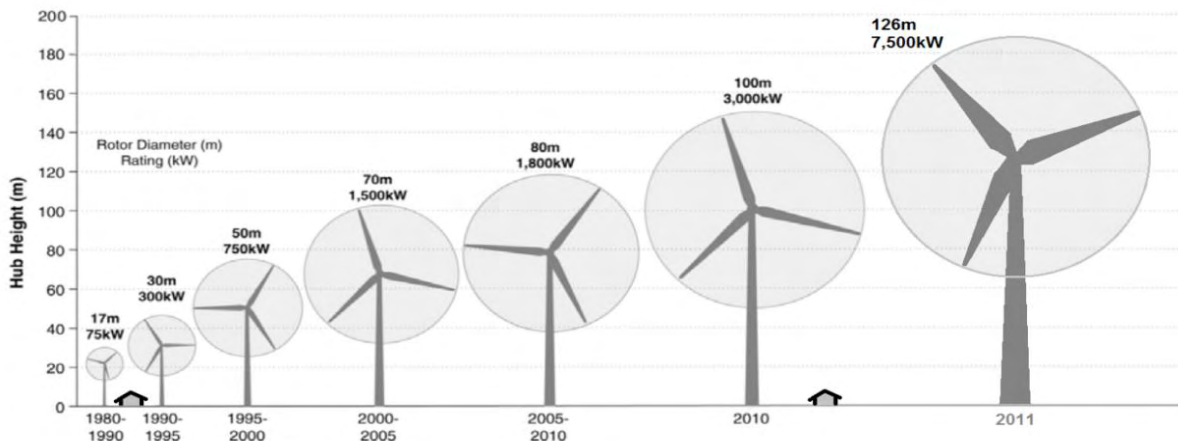
Το 1988, το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας του Καναδά σε συνδυασμό με την εταιρεία Hydro-Québec δημιούργησαν την ανεμογεννήτρια Eole, χωρητικότητας 4MW, κατηγορίας Darrieus, με καμπυλωτά πτερύγια. Το συγκεκριμένο μοντέλο θεωρήθηκε ως ένα τεχνικό θαύμα, ωστόσο η λειτουργία του ήταν αρκετά κοστοβόρα με αποτέλεσμα στην πάροδο των χρόνων να διακοπεί οριστικά.

1.6 21^{ος} Αιώνας

Με την έναρξη του 21^{ου} αιώνα τα ορυκτά καύσιμα ήταν σχετικά φθηνά, αλλά οι αυξανόμενες ανησυχίες για την υπερθέρμανση του πλανήτη και την ενδεχόμενη εξάντληση των ορυκτών καυσίμων οδήγησαν σε αύξηση του ενδιαφέροντος για όλες τις διαθέσιμες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας. Η νεοσύστατη εμπορική βιομηχανία της αιολικής ενέργειας άρχισε να αναπτύσσεται με έντονο ρυθμό, λόγω της άμεσης διαθεσιμότητας μεγάλων αιολικών πόρων και της μείωσης του κόστους λόγω της βελτίωσης της τεχνολογίας και της διαχείρισης των αιολικών πάρκων. Παλαιότερες πετρελαϊκές κρίσεις είχαν ήδη προκαλέσει τη μετατόπιση πολλών βιομηχανικών χρηστών πετρελαίου, άνθρακα και φυσικού αερίου στην αγορά της αιολικής ενέργειας.

Η αιολική ενέργεια θεωρήθηκε ως ιδανική επιλογή για αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς ήταν σημαντικά πιο οικονομική. Οι τεχνολογικές καινοτομίες που καθίστανται πλέον δυνατές από την πρόοδο της μηχανικής, εξακολουθούν να οδηγούν σε νέες εξελίξεις στον κλάδο της αιολικής ενέργειας. Μέχρι το 2014, πάνω από 240.000 ανεμογεννήτριες εμπορικού μεγέθους λειτουργούσαν στον κόσμο, παράγοντας το 4% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ξεπέρασε τα 336GW το 2014, με την Κίνα, τις ΗΠΑ και τη Γερμανία να πρωτοπορούν στον

αριθμό των εγκαταστάσεων [4]. Μέχρι το 2015, η μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια, η Vestas V164 είχε χωρητικότητα 8MW και χρησιμοποιούνταν σε μεγάλα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Στην [Εικόνα 1.5](#) παρουσιάζεται η εξέλιξη των ανεμογεννητριών τα τελευταία χρόνια.



Εικόνα 1.5: Η εξέλιξη των σύγχρονων ανεμογεννητριών.

1.7 Η Ανάπτυξη των Ανεμογεννητριών σε Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα

Στις αρχές του 2000, πέρα από την χερσαία αιολική ενέργεια άρχισε να αναπτύσσεται και η υπεράκτια. Η πρώτη πλωτή ανεμογεννήτρια μεγάλης χωρητικότητας στον κόσμο, η Hywind, άρχισε να λειτουργεί στη Βόρειο Θάλασσα της Νορβηγίας στα τέλη του 2009 με το κόστος της να ανέρχεται στα 62 εκατομμύρια δολάρια για την κατασκευή και την συντήρηση της [4]. Οι πλωτές ανεμογεννήτριες διαφέρουν κατασκευαστικά σε μεγάλο βαθμό από τις τυπικές ανεμογεννήτριες και η τεχνολογία τους είναι πλησιέστερη με αυτή των πλωτών εξεδρών πετρελαίου. Στα τέλη του 2011, η Ιαπωνία ανακοίνωσε σχέδια για την κατασκευή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου πολλαπλών μονάδων, με έξι ανεμογεννήτριες της τάξης των 2 Megawatt στα ανοικτά των ακτών της Φουκουσίμα, όπου το τσουνάμι του 2011 οδήγησε σε μεγάλη πυρηνική καταστροφή με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη έλλειψη ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι το 2016, η Ιαπωνία είχε κατασκευάσει 80 επιπλέον πλωτές ανεμογεννήτριες με κόστος περίπου 15 δις γιεν

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΧΕΡΣΑΙΑ ΚΑΙ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

2.1 Εισαγωγή

Δεδομένου ότι οι πρώτες ανεμογεννήτριες κατασκευάστηκαν στα τέλη του 1800, τα πρώτα αιολικά πάρκα που τέθηκαν σε λειτουργία βρίσκονταν σε χερσαίες εκτάσεις και ως αποτέλεσμα ήταν αυτά που κυριάρχησαν στην αγορά της αιολικής ενέργειας. Ωστόσο η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη οδήγησε στην κατεύθυνση της υλοποίησης και των υπεράκτιων αιολικών πάρκων.

2.2 Χερσαία Αιολικά Πάρκα

Πριν από τις αρχές της δεκαετίας του 2000, ουσιαστικά το σύνολο της αιολικής ενέργειας παράγονταν από τα χερσαία αιολικά πάρκα. Η χερσαία ενέργεια είναι φθηνότερη, ενώ απαιτεί λιγότερο δαπανηρές υποδομές και τεχνολογικό εξοπλισμό. Το μεγαλύτερο εμπόδιο στην αναβάθμιση των χερσαίων ανεμογεννητριών είναι το μεγάλο εύρος της ταχύτητας του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες συνήθως σχεδιάζονται για να λειτουργούν σε μια ιδανική ταχύτητα και υφίστανται δραστική απώλεια αποδοτικότητας, όταν η ταχύτητα του ανέμου αποκλίνει κατά πολύ από την συγκεκριμένη ταχύτητα [\[5\]](#). Στην πραγματικότητα επειδή οι χερσαίες ανεμογεννήτριες είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν σε ανέμους χαμηλής ταχύτητας οι οποίοι συναντώνται συχνότερα στην ξηρά, όταν πνέουν ισχυροί θυελλώδεις άνεμοι είναι πιο αποδοτικό να διακόπτουμε την λειτουργία τους για να μειώσουμε τη φθορά και να ελαχιστοποιήσουμε τον κίνδυνο σοβαρής βλάβης.

Επιπλέον, η κατεύθυνση του ανέμου είναι μεταβαλλόμενη ανά τον κόσμο. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα πρέπει να έχουν κατεύθυνση προς τον άνεμο για να συλλέγουν ενέργεια, οπότε αν ο άνεμος αλλάξει κατεύθυνση είναι επίσης πολύ ανεπαρκής. Οι νέες ανεμογεννήτριες μπορούν να περιστραφούν ελαφρά ή να αλλάξουν ήπια την κλίση των λεπίδων τους για να προσαρμοστούν στην μεταβαλλόμενη κατεύθυνση και στην ταχύτητα του ανέμου. Αυτά τα μέτρα αυξάνουν την αποδοτικότητα των ανεμογεννητριών

αλλά ταυτόχρονα παρέχουν και κίνητρο για την έρευνα νέων τεχνολογιών που αντιμετωπίζουν καλύτερα τα παραπάνω προβλήματα.

Στην [Εικόνα 2.1](#) παρουσιάζεται το μεγαλύτερο χερσαίο αιολικό πάρκο στον κόσμο.



Εικόνα 2.1: Το αιολικό πάρκο Gansu στην Κίνα είναι το μεγαλύτερο χερσαίο αιολικό πάρκο στον κόσμο, με στόχο η χωρητικότητά του να φτάσει τα 20.000 MW έως το 2020.

2.2.1 Πλεονεκτήματα

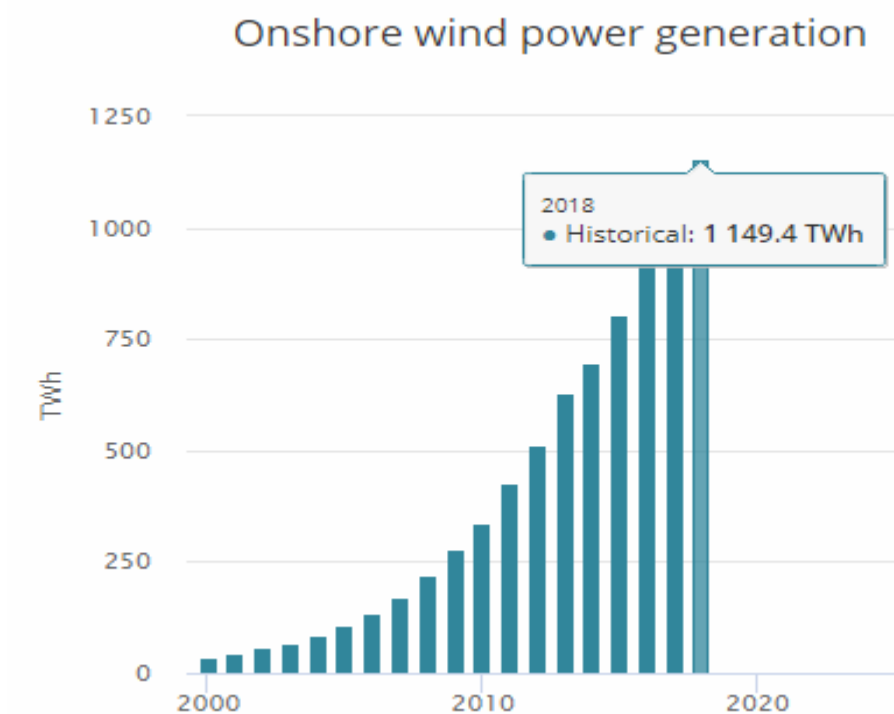
- Το κόστος των χερσαίων αιολικών πάρκων είναι σχετικά φτηνό, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την μαζική εγκατάσταση μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών.
- Η μικρότερη απόσταση μεταξύ των αιολικών πάρκων και του καταναλωτή έχει ως αποτέλεσμα την μειωμένη πτώση τάσης κατά την μεταφορά του ρεύματος.
- Οι ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται σε λίγους μήνες σε αντίθεση με έναν πυρηνικό σταθμό ο οποίος μπορεί να χρειαστεί μέχρι και είκοσι χρόνια για να κατασκευαστεί [\[6\]](#).

2.2.2 Μειονεκτήματα

- Τα χερσαία αιολικά πάρκα επηρεάζουν δραστικά τα τοπία στα οποία είναι εγκατεστημένα, με αποτέλεσμα την παραμόρφωση της φυσικής ομορφιάς τους.
- Δεν παράγουν ενέργεια καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, λόγω της συχνά χαμηλής ταχύτητας του ανέμου ή των φυσικών φραγμών που υπάρχουν από κτίρια και λόφους.
- Ο θόρυβος που δημιουργούν οι ανεμογεννήτριες είναι πολύ μεγάλος και συχνά αυτή η ηχητική ρύπανση προκαλεί έντονη δυσφορία στις κοντινές περιοχές [\[6\]](#).

2.2.3 Στατιστικά Στοιχεία

Παρακάτω παρατίθενται μερικά στατιστικά στοιχεία όπως η εξέλιξη της παραγόμενης χωρητικότητας στα χερσαία αιολικά πάρκα ([Εικόνα 2.2](#)) και η λίστα με τα μεγαλύτερα χερσαία αιολικά πάρκα στον κόσμο ([Πίνακας 2.1](#)).



Εικόνα 2.2: Εξέλιξη της παραγόμενης χωρητικότητας από χερσαία αιολικά πάρκα παγκοσμίως [\[7\]](#).

Πίνακας 2.1: Τα μεγαλύτερα χερσαία αιολικά πάρκα στον κόσμο [\[8\]](#).

Κατάταξη	Αιολικό Πάρκο	Χωρητικότητα(MW)	Χώρα
1	Gansu Wind Farm	7,965	Κίνα
2	Alta Wind Energy Center	1,548	ΗΠΑ
3	Muppandal wind farm	1,500	Ινδία
4	Jaisalmer Wind Park	1,064	Ινδία
5	Shepherds Flat Wind Farm	845	ΗΠΑ
6	Roscoe Wind Farm	781.5	ΗΠΑ
7	Horse Hollow Wind Energy Center	735.5	ΗΠΑ
8	Capricorn Ridge Wind Farm	662.5	ΗΠΑ
9	Fântânele-Cogealac Wind Farm	600	Ρουμανία
10	Fowler Ridge Wind Farm	599.8	ΗΠΑ

2.3 Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα

Αν και η συγκεκριμένη τεχνολογία ήταν γνωστή τις τελευταίες δεκαετίες, άρχισε να θεωρείται ως σοβαρή εναλλακτική λύση μόλις τα τελευταία 15 χρόνια. Ένας μεγάλος

αριθμός προβλημάτων που επηρεάζουν τα χερσαία αιολικά πάρκα δεν επηρεάζουν τα υπεράκτια. Οι ταχύτητες του ανέμου που πνέουν στους ωκεανούς είναι συνήθως πολύ υψηλότερες από εκείνες των χερσαίων αιολικών πάρκων αλλά, ταυτόχρονα και πολύ πιο συνεπείς από την άποψη ότι δεν υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις στις ταχύτητες τους. Επιπλέον, οι ταχύτητες του ανέμου στα υπεράκτια αιολικά πάρκα τείνουν να αυξάνονται το απόγευμα όπου η ζήτηση ισχύος είναι υψηλότερη, σε αντίθεση με τις ταχύτητες ανέμου στην ξηρά που τείνουν να αυξάνονται κατά τη διάρκεια της νύχτας. Έτσι, εάν οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι ρυθμισμένες για τις αυξημένες ταχύτητες που υπάρχουν τα απογεύματα, θα παρέχουν περισσότερη ισχύ για εκείνη την περίοδο και δεν θα δημιουργηθούν προβλήματα ζήτησης [5]. Αυτό μπορεί να μειώσει τον αριθμό των εφεδρικών εργοστασίων που πρέπει να διατηρούνται με σκοπό την παροχή ενέργειας σε περιόδους με αυξημένη ζήτηση.

Ένα άλλο πρόβλημα των χερσαίων αιολικών πάρκων είναι η αντιπάθεια που τρέφει προς αυτά ο κόσμος διότι καταστρέφουν την φυσική ομορφιά των τοπίων και συχνά υπάρχει μεγάλη δημόσια πίεση που πρέπει να ξεπεραστεί όταν πρόκειται να υλοποιηθούν τέτοιες εγκαταστάσεις. Επιπλέον, πολλές μεγάλες πόλεις με μεγάλη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, βρίσκονται κοντά στις ακτές γεγονός που σημαίνει ότι η ενέργεια που παράγεται από υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις δεν χρειάζεται να μεταφερθεί με την χρήση ακριβών γραμμών μεταφοράς, διότι μπορεί να γίνει με την χρήση μικρού μήκους υποβρύχιων καλωδίων.

Δυστυχώς όπως και τα χερσαία έτσι και τα υπεράκτια αιολικά πάρκα έχουν τα μειονεκτήματά τους. Η κατασκευή των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι αρκετά δαπανηρή. Οι ανεμογεννήτριες πρέπει να είναι σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να αντέχουν πρόσθετη φθορά λόγω των υψηλότερων ταχυτήτων του ανέμου. Η εγκατάσταση χερσαίων ανεμογεννητριών είναι πολύ απλούστερη και πολύ φθηνότερη από την αντίστοιχη των υπεράκτιων, διότι στα υπεράκτια αιολικά πάρκα πρέπει να πληρούνται σημαντικές προϋποθέσεις όσον αφορά τις δομές του ωκεάνιου δαπέδου. Μόλις ολοκληρωθεί η εγκατάσταση, η λειτουργία και το κόστος συντήρησης είναι επίσης πολύ υψηλότερο για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα.

Στην [Εικόνα 2.3](#) παρουσιάζεται η μορφή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου.



Εικόνα 2.3: Ανεμογεννήτριες και ηλεκτρικός υποσταθμός του υπεράκτιου αιολικού πάρκου Alpha Ventus στην Γερμανία.

2.3.1 Πλεονεκτήματα

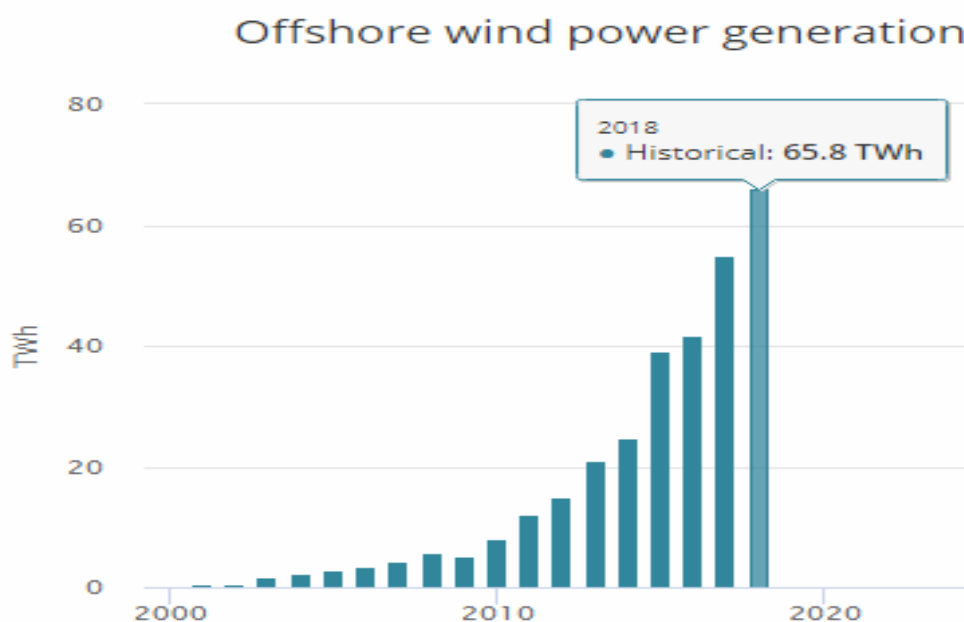
- Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να κατασκευαστούν πολύ μεγαλύτερες και ψηλότερες επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο μεγαλύτερη συλλογή ενέργειας.
- Συνήθως στα υπεράκτια αιολικά πάρκα πνέουν άνεμοι μεγαλύτερων ταχυτήτων οι οποίοι επιτρέπουν την παραγωγή μεγαλύτερων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας.
- Δεν υπάρχουν φυσικοί περιορισμοί όπως λόφοι ή κτίρια που θα μπορούσαν να εμποδίσουν τη ροή του ανέμου.
- Τα αιολικά πάρκα έχουν μηδαμινό αντίκτυπο στο περιβάλλον, καθώς δεν κατασκευάζονται σε λωρίδες ναυσιπλοΐας, περιοχές αλιείας ή σε προστατευόμενα μέρη [\[6\]](#).

2.3.2 Μειονεκτήματα

- Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι το κόστος. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι κατά 90% ακριβότερα από τις γεννήτριες ορυκτών καυσίμων και 50% περισσότερο από τις πυρηνικές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για να κατασκευαστεί ένα υπεράκτιο πάρκο, πρέπει να κατασκευαστεί μια ολόκληρη πλατφόρμα για να το υποστηρίξει αλλά και τα καλώδια που απαιτούνται πρέπει να διανύουν μεγάλη απόσταση για να συνδεθούν σε χερσαίες μπαταρίες.
- Τα καλώδια μεγάλου μήκους έχουν ως αποτέλεσμα την πτώση της τάσης, που σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του καλωδίου τόσο μεγαλύτερη είναι η απώλεια ισχύος [\[6\]](#).

2.3.3 Στατιστικά Στοιχεία

Παρακάτω παρατίθενται μερικά στατιστικά στοιχεία όπως η εξέλιξη της παραγόμενης χωρητικότητας στα υπεράκτια αιολικά πάρκα ([Εικόνα 2.4](#)) και η λίστα με τα μεγαλύτερα υπεράκτια αιολικά πάρκα στον κόσμο ([Πίνακας 2.2](#)).



Εικόνα 2.4: Εξέλιξη της παραγόμενης χωρητικότητας από υπεράκτια αιολικά πάρκα παγκοσμίως [\[9\]](#).

Πίνακας 2.2: Τα μεγαλύτερα υπεράκτια αιολικά πάρκα στον κόσμο [\[10\]](#).

Κατάταξη	Αιολικό Πάρκο	Χωρητικότητα(MW)	Χώρα
1	Walney Extension	659	Ηνωμένο Βασίλειο
2	London Array	630	Ηνωμένο Βασίλειο
3	Gemini Wind Farm	600	Ολλανδία
4	Gode Wind (phases1+2)	582	Γερμανία
5	Gwynt y Mor	576	Ηνωμένο Βασίλειο
6	Race Bank	573	Ηνωμένο Βασίλειο
7	Greater Gabbard	504	Ηνωμένο Βασίλειο
8	Dudgeon	402	Ηνωμένο Βασίλειο
9	Veja Mate	402	Γερμανία
10	Anholt	402	Δανία

2.4 Συμπεράσματα

Συνολικά, οι ανεμογεννήτριες ανεξάρτητα από την τοπολογία τους, εγκαθίστανται ευκολότερα σε σύγκριση με άλλες εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως είναι οι σταθμοί πυρηνικής ενέργειας. Πολλοί εξωτερικοί παράγοντες συμπεριλαμβανομένης της πολιτικής, οικονομικής και γεωγραφικής κατάστασης της συγκεκριμένης περιοχής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πριν από την έναρξη μιας κατασκευής. Επομένως, για την κατασκευή είτε χερσαίου είτε υπεράκτιου αιολικού πάρκου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι παραπάνω παράγοντες, σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που προσφέρουν οι δύο αυτές επιλογές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Υπάρχουν δύο τύποι ανεμογεννητριών, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT) και οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (VAWT). Παρόλο την μεγάλη αύξηση των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα εξακολουθούν να είναι πιο πρακτικές και δημοφιλής και βρίσκονται περισσότερο στο επίκεντρο των ερευνητικών προγραμμάτων.

3.2 Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα

Ο άξονας περιστροφής του ρότορα της ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα είναι παράλληλος [\[11\]](#) στην κατεύθυνση του ανέμου. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες αποτελούνται από δύο ή τρεις λεπίδες, αν και μερικές μπορεί να έχουν λιγότερες ή περισσότερες λεπίδες. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα λειτουργούν όταν ο άνεμος διέρχεται και από τις δύο επιφάνειες της λεπίδας, αλλά περνά ταχύτερα στην άνω πλευρά της λεπίδας, δημιουργώντας έτσι μια περιοχή χαμηλότερης πίεσης πάνω από την αεροτομή [\[12\]](#). Η διαφορά στις πιέσεις των επάνω και κάτω επιφανειών οδηγεί σε αεροδυναμική ανύψωση. Τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας είναι τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η δύναμη της ανύψωσης να προκαλεί περιστροφή γύρω από το άξονα. Υπάρχουν δύο είδη ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα, οι προσήνεμες και οι υπήνεμες.

Στην [Εικόνα 3.1](#) παρουσιάζεται μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα.



Εικόνα 3.1: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα.

3.2.1 Κατηγοριοποίηση Ανεμογεννητριών Οριζόντιου Άξονα

3.2.1.1 Προσήνεμες Ανεμογεννήτριες

Οι προσήνεμες ανεμογεννήτριες έχουν ως βασικό γνώρισμα λειτουργίας ότι ο άνεμος συναντάει πρώτα τα πτερύγια και μετά τον πυλώνα [\[12\]](#). Το μεγαλύτερο ποσοστό των ανεμογεννητριών είναι τέτοιου τύπου. Το βασικό πλεονέκτημα αυτών των ανεμογεννητριών είναι ότι μπορεί να τοποθετηθούν σε περισσότερα μέρη λόγω του μεγέθους τους. Από την άλλη πλευρά, το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι ο ρότορας τους είναι άκαμptos και τοποθετημένος σε μακρινή απόσταση από τον πύργο και επίσης απαιτείται ένας μηχανισμός εκτροπής για να κρατήσει το ρότορα σε κατεύθυνση αντίθετη προς αυτή του ανέμου.

Στην [Εικόνα 3.2](#) παρουσιάζεται μια προσήνεμη ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα.

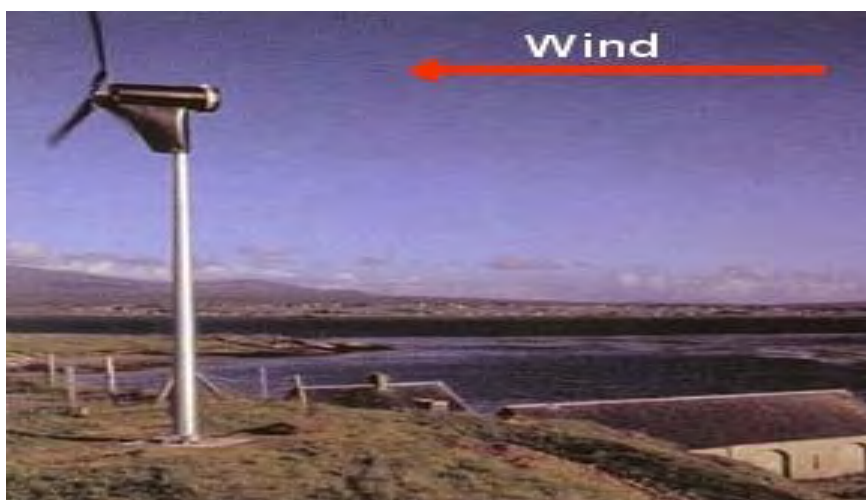


Εικόνα 3.2: Προσήνεμη ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα.

3.2.1.2 Υπήνεμες Ανεμογεννήτριες

Οι υπήνεμες ανεμογεννήτριες έχουν ως βασικό γνώρισμα λειτουργίας ότι ο άνεμος συναντάει πρώτα τον πυλώνα και μετά τα πετρύγια, ενώ έχουν το θεωρητικό πλεονέκτημα ότι μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς μηχανισμό εκτροπής [\[12\]](#). Επιπλέον, ο ρότορας μπορεί να γίνει πιο εύκαμπτος, ενώ βασικό μειονέκτημα τους αποτελεί η διακύμανση της αιολικής ενέργειας, διότι ο ρότορας έχει την ίδια κατεύθυνση με αυτή του ανέμου.

Στην [Εικόνα 3.3](#) παρουσιάζεται μια υπήνεμη ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα.



Εικόνα 3.3: Υπήνεμη ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα.

3.2.2 Πλεονεκτήματα

- Τα πτερύγια βρίσκονται κοντά στο κέντρο βάρους των ανεμογεννητριών, συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στην σταθερότητα τους.
- Η ανεμογεννήτρια συλλέγει τη μέγιστη ποσότητα αιολικής ενέργειας επιτρέποντας στη γωνία πυροδότησης (γωνία μεταξύ της γραμμής της χορδής και της κατεύθυνσης του ανέμου) να προσαρμόζεται από απόσταση (remotely).
- Υπάρχει η ικανότητα ελέγχου των λεπίδων π.χ. σε μια καταιγίδα, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η ζημιά.
- Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα ξεκινούν αυτόματα.
- Είναι οικονομικότερες λόγω του υψηλότερου όγκου παραγωγής.

3.2.3 Μειονεκτήματα

- Προκύπτουν προβλήματα λειτουργίας όταν είναι εγκατεστημένες κοντά στο έδαφος.
- Οι ψηλοί πύργοι και οι μακριές λεπίδες είναι δύσκολο να μεταφερθούν σε περίπτωση μετεγκατάστασης.
- Μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα πλοήγησης όταν τοποθετούνται σε υπεράκτια αιολικά πάρκα.

3.3 Ανεμογεννήτριες Κάθετου Άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα είναι μια παλιά τεχνολογία που χρονολογείται εδώ και 4.000 χρόνια. Σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα ο ρότορας τους περιστρέφεται κάθετα γύρω από τον άξονά [\[11\]](#), ενώ είναι αποδοτικές σε περιπτώσεις χαμηλής ταχύτητας του ανέμου και επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι εγκαθίστανται ευκολότερα και είναι ασφαλέστερες [\[12\]](#). Ωστόσο, επειδή η αποτελεσματικότητά τους είναι κατά 70% μικρότερη από τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, χρησιμοποιούνται συνήθως μόνο για ιδιωτική χρήση.

Στην [Εικόνα 3.4](#) παρουσιάζεται μια ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα.



Εικόνα 3.4: Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα.

3.3.1 Κατηγοριοποίηση Ανεμογεννητριών Κάθετου Άξονα

3.3.1.1 Ανεμογεννήτριες Darrieus

Οι ανεμογεννήτριες Darrieus αποτελούνται από έναν κατακόρυφο ρότορα και από κάθετα προσανατολισμένες λεπίδες. Απαιτείται ένας μικρός κινητήρας για να ξεκινήσει η περιστροφή τους, δεδομένου ότι δεν έχουν την δυνατότητα να ξεκινήσουν μόνες τους [\[12\]](#). Όταν αποκτήσουν αρκετή ταχύτητα, ο αέρας που διέρχεται από τις αεροτομές δημιουργεί ροπή και έτσι ο ρότορας περιστρέφεται αποκλειστικά με την δύναμη του ανέμου. Οι λεπίδες επιτρέπουν στην ανεμογεννήτρια να φτάσει σε ταχύτητες υψηλότερες από την πραγματικές, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για παραγωγή ηλεκτρισμού όταν είναι εγκατεστημένες σε περιοχές όπου πνέουν πολύ δυνατοί άνεμοι.

Στην [Εικόνα 3.5](#) παρουσιάζεται μια ανεμογεννήτρια Darrieus κάθετου άξονα.



Εικόνα 3.5: Ανεμογεννήτρια Darrieus κάθετου άξονα.

3.3.1.2 Ανεμογεννήτριες Giromill

Οι ανεμογεννήτριες Giromill αποτελούν μια ειδική κατηγορία των Darrieus. Έχουν την ίδια λειτουργικότητα με τις Darrieus όσον αφορά την πρόσληψη ενέργειας, αλλά χρησιμοποιούν 2-3 λεπίδες ίσου μήκους προσαρτημένες στον κατακόρυφο άξονα [\[12\]](#). Εφαρμόζεται επίσης η χρήση ελικοειδών λεπίδων προσαρτημένων γύρω από τον κατακόρυφο άξονα με σκοπό την ελαχιστοποίηση της παλμικής ροπής.

Στην [Εικόνα 3.6](#) παρουσιάζεται μια ανεμογεννήτρια Giromill κάθετου άξονα.



Εικόνα 3.6: Ανεμογεννήτρια Giromill κάθετου άξονα.

3.3.2 Πλεονεκτήματα

- Τα εξαρτήματα των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα τοποθετούνται πλησιέστερα στο έδαφος, έτσι η πρόσβαση με σκοπό την συντήρηση είναι ευκολότερη.
- Το κόστος παραγωγής, εγκατάστασης και μεταφοράς είναι αρκετά μικρότερο.
- Η ανεμογεννήτρια δεν χρειάζεται να είναι στραμμένη προς τον άνεμο για να είναι αποτελεσματική.
- Είναι αποδοτικές σε μέρη όπως οι λόφοι, οι κορυφογραμμές και τα περάσματα.
- Τα πτερύγια στρέφονται με χαμηλότερη ταχύτητα, μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες τραυματισμού πουλιών.
- Είναι κατάλληλες για περιοχές με ακραίες καιρικές συνθήκες όπως τα βουνά και οι λόφοι.

3.3.3 Μειονεκτήματα

- Η αποτελεσματικότητα τους είναι 50% μικρότερη από τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.
- Οι άνεμοι κοντά στο έδαφος και άλλα αντικείμενα μπορούν να οδηγήσουν στην δημιουργία ροής με μεγάλες διακυμάνσεις, εισάγοντας με αυτό τον τρόπο ζητήματα δόνησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Η ανεμογεννήτριες είναι σύνθετες μηχανές. Προκειμένου να σχεδιαστούν αποδοτικές και λειτουργικές, απαιτείται γνώση από ποικίλα επιστημονικά πεδία: αεροδυναμική, μηχανολογία, ηλεκτρική και ηλεκτρονική μηχανική, υλικά, μετεωρολογία και αυτόματο έλεγχο μεταξύ άλλων. Συνεπώς είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τα λειτουργικά μέρη μια ανεμογεννήτριας, έτσι ώστε να υπάρχει δυνατότητα συνεχής βελτίωσης της απόδοσης της.

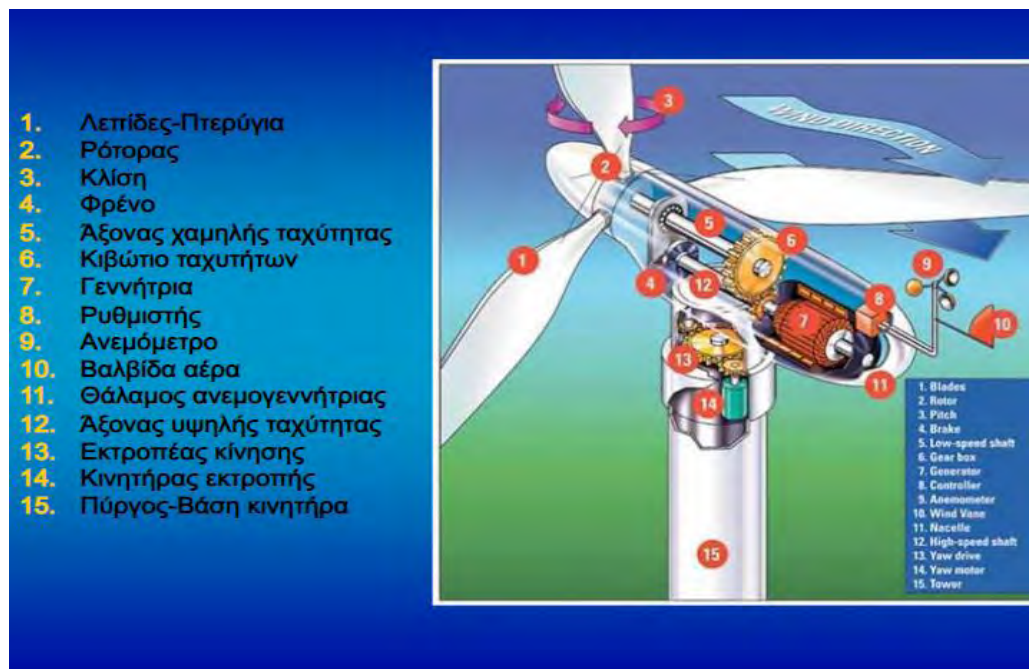
Ο σχεδιασμός των ανεμογεννητριών στοχεύει στη βέλτιστη λειτουργία, δηλαδή στη μεγιστοποίηση του βαθμού μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια, παρέχοντας ταυτόχρονα όσο το δυνατόν καλύτερες συνθήκες εργασίας. Επομένως, η απόδοση των ανεμογεννητριών κρίνεται βάση τριών παραγόντων:

1. Αποτελεσματικότητα της χρήσης αιολικής ενέργειας μέσω της επιλογής γεννήτριας και των ρυθμιστών ελέγχου.
2. Αξιοπιστία, π.χ. προστασία από κεραυνό.
3. Ασφάλεια, π.χ. συμμόρφωση σύνδεσης δικτύου.

Μια τυπική ανεμογεννήτρια ([Εικόνα 4.1](#)) είναι τοποθετημένη σε στερεά θεμέλια από σκυρόδεμα και είναι σωστά γειωμένη. Η έξοδος της είναι της τάξεως των 690 Volt και συνδέεται μέσω μετασχηματιστή στη γραμμή δικτύου των 20 KV. Η ανεμογεννήτρια αποτελείται από τον κύριο πύργο, τις τρεις λεπίδες και το εξωτερικό περίβλημα. Μέσα στο περίβλημα και στη βάση του πύργου στεγάζονται τα διάφορα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά μέρη που είναι απαραίτητα για την αποτελεσματική λειτουργία και την ασφαλή μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Μερικά από αυτά είναι οι ρυθμιστές ισχύος, η γεννήτρια και τα ηλεκτρονικά ισχύος. Αυτό αποτελεί το βασικό πρότυπο που ωστόσο δεν ακολουθείται πάντοτε, για παράδειγμα ο σταθμός μετασχηματιστών μπορεί να στεγάζεται στη βάση του πύργου.

Το ηλεκτρικό σύστημα μιας ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει όλα τα εξαρτήματα για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια, όπως επίσης και το σύστημα

ελέγχου και εποπτείας. Το ηλεκτρικό σύστημα αποτελεί επομένως το δεύτερο βασικό υποσύστημα μετά το μηχανικό σε μια ανεμογεννήτρια. Παρακάτω θα αναλυθούν τα βασικά μέρη των ανεμογεννητριών.



Εικόνα 4.1: Τα εξαρτήματα μιας ανεμογεννήτριας.

4.2 Πύργος

Ο πύργος είναι απαραίτητος για την στήριξη των επιμέρους μερών της ανεμογεννήτριας και την τοποθέτηση τους στο κατάλληλο υψόμετρο έτσι ώστε να λειτουργούν στις κατάλληλες συνθήκες από άποψη ταχύτητας ανέμου [13]. Μια ανεμογεννήτρια πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 μέτρα υψηλότερη από τα εμπόδια που υπάρχουν στο περιβάλλον όπως τα δέντρα ή οι λόφοι. Οι πύργοι (Εικόνα 4.2) των μικρών ανεμογεννητριών είναι συνήθως σχεδιασμένοι με πόλους που υποστηρίζονται από ειδικά καλώδια, τα οποία συνδέονται με τον πύργο και αγκυροβολούνται στο έδαφος, έτσι ώστε ο πύργος να μένει σταθερός και ανεπηρέαστος από την από τη δύναμη του ανέμου. Οι πύργοι μεγάλων ανεμογεννητριών κατασκευάζονται συνήθως είτε από χάλυβα, είτε από σκυρόδεμα και στην πλειοψηφία τους έχουν σωληνοειδές σχήμα. Οι πύργοι πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αντιστέκονται στην κατεύθυνση που παράγεται από την ανεμογεννήτρια.



Εικόνα 4.2: Πύργος ανεμογεννήτριας σε υπεράκτιο αιολικό πάρκο.

4.3 Θάλαμος

Ο θάλαμος [\(Εικόνα 4.3\)](#) είναι το περίβλημα που προστατεύει το κύριο πλαίσιο και τα εξαρτήματα που βρίσκονται μέσα σε αυτό. Αυτό το περίβλημα είναι ιδιαίτερα σημαντικό επίσης για την προστασία των ηλεκτρικών συστημάτων από τις αντίξοες καιρικές συνθήκες.



Εικόνα 4.3: Θάλαμος ανεμογεννήτριας.

4.4 Λεπίδες του Ρότορα

Ο σχεδιασμός των λεπίδων του ρότορα έχει βασιστεί στην τεχνολογία των αεροπλάνων. Χρησιμοποιείται η αεροδυναμική δύναμη ανύψωσης Bernoulli που μια αεροτομή υφίσταται από το μεταβαλλόμενο ρεύμα του αέρα [\[13\]](#). Η πλειοψηφία των ανεμογεννητριών παγκοσμίως έχει τρεις πλαστικές, ενισχυμένες με γυαλί λεπίδες [\(Εικόνα 4.4\)](#). Το σχήμα τους καθώς και η γωνία προσβολής σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου, επηρεάζει την απόδοση της ανεμογεννήτριας. Οι εγγενείς μηχανικές ιδιότητες των ροτόρων και η σχεδίασή τους επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής τους, η οποία εξαρτάται επίσης και από τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον κατά τη λειτουργία τους.



Εικόνα 4.4: Λεπίδες ανεμογεννήτριας.

4.5 Κιβώτιο Ταχυτήτων

Ως κεντρικό σημείο του συστήματος κίνησης, το κιβώτιο ταχυτήτων [\(Εικόνα 4.5\)](#) μετατρέπει τη χαμηλή ταχύτητα του άξονα του ρότορα σε υψηλή περιστροφική, η οποία θέτει τη γεννήτρια σε λειτουργία.



Εικόνα 4.5: Κιβώτιο ταχυτήτων σύγχρονης ανεμογεννήτριας.

4.6 Φρένα Ασφαλείας

Το κύριο σύστημα πέδησης για τις περισσότερες σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι το αεροδυναμικό σύστημα πέδησης, το οποίο ουσιαστικά συνίσταται στην περιστροφή των λεπίδων του ρότορα 90 μοίρες, κατά μήκος του άξονά τους [13]. Αυτά τα συστήματα έχουν συνήθως και ελατήριο, για να λειτουργούν ακόμη και σε περίπτωση διακοπής της ηλεκτρικής τροφοδοσίας και αυτομάτως να ενεργοποιούνται αν το υδραυλικό σύστημα στην ανεμογεννήτρια χάσει την απαραίτητη πίεση. Το υδραυλικό σύστημα χρησιμοποιείται για να επιστρέφουν τα πτερύγια στη θέση τους μόλις τελειώσει μια κατάσταση κινδύνου. Η εμπειρία έχει αποδείξει ότι τα αεροδυναμικά συστήματα πέδησης είναι εξαιρετικά ασφαλή, καθώς ακινητοποιούν την ανεμογεννήτρια σε ένα με δύο κύκλους περιστροφής το πολύ. Επιπλέον, προσφέρουν έναν πολύ ήπιο τρόπο φρεναρίσματος χωρίς μεγάλη πίεση και φθορά στον πύργο και τα μηχανήματα.

4.7 Έλεγχος Ισχύος

Οι ανεμογεννήτριες είναι σχεδιασμένες να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια όσο το δυνατόν φθηνότερα γίνεται. Συνεπώς, κατασκευάζονται έτσι ώστε να αποδίδουν μέγιστη απόδοση σε ταχύτητες ανέμου που φτάνουν μέχρι και τα 33 mph. Δεν είναι αποδοτικό για το σχεδιασμό των ανεμογεννητριών να μεγιστοποιήσουν την απόδοση τους σε ισχυρότερους ανέμους, επειδή τέτοιου είδους άνεμοι είναι σπάνιοι. Σε περίπτωση ισχυρότερων ανέμων, είναι

απαραίτητο να αποβάλουμε μέρος της υπερβολικής ενέργειας του ανέμου για να αποφευχθούν τυχόν βλάβες, ενώ σε περίπτωση ασθενέστερων ταχυτήτων είναι επιθυμητό να παρέχεται ταχύτητα με σκοπό την βέλτιστη απόδοση. Συνεπώς, όλες οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται με κάποιου είδους έλεγχου ισχύος [\[14\]](#).

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να πραγματοποιηθεί ο συγκεκριμένος έλεγχος στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες όπως:

1. Έλεγχος κλίσης
2. Έλεγχος καθυστέρησης (παθητικός ή ενεργός)
3. Έλεγχος εκτροπής

4.7.1 Έλεγχος Κλίσης

Ο έλεγχος κλίσης σχετίζεται με την αλλαγή της γωνίας κλίσης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, έτσι ώστε η ταχύτητα του δρομέα και επομένως η ροπή και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια να διατηρούνται στα επιθυμητά επίπεδα. Αυτός είναι ένας τρόπος για να κατασκευαστεί μια ανεμογεννήτρια «σταθερής ταχύτητας» και μπορεί να υλοποιηθεί είτε με μηχανικό (υδραυλικό), είτε με ηλεκτρικό (κινητήρα) μέσο. Ο κινητήρας χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον στις μέρες μας και επιπλέον συμβάλει στον έλεγχο κάθε λεπίδας ανεξάρτητα. Ο έλεγχος κλίσης αποτελεί επίσης και μηχανισμό ασφαλείας, αφού μπορεί να περιορίσει τα επίπεδα λειτουργίας της εκάστοτε μηχανής.

4.7.1.1 Θεωρία και Εφαρμογή

Η ικανότητα μιας ανεμογεννήτριας να εξάγει ενέργεια από τον άνεμο γίνεται συναρτήσεως τριών βασικών παραγόντων:

1. Διαθεσιμότητα ισχύος αιολικής ενέργειας.
2. Καμπύλη ισχύος της μηχανής.
3. Ικανότητα της μηχανής να ανταποκρίνεται στις διαταραχές του ανέμου.

Η εξίσωση για τη μηχανική ισχύ P_m , που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια δίνεται από την σχέση:

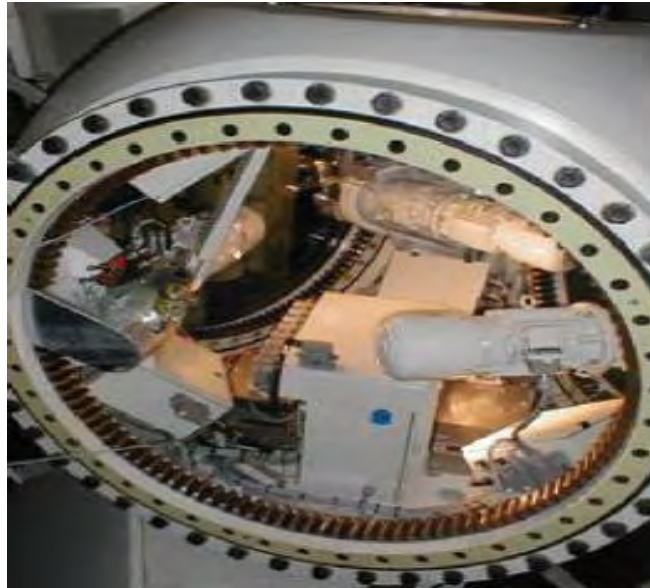
$$P_m = 0.5\rho C_p \left(\frac{\omega R}{v}, \theta \right) A(\gamma) v^3 \quad 4.1$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3), θ η γωνία κλίσης του πτερυγίου (rad), γ η γωνία κλίσης του δρομέα (rad), v η ταχύτητα του ανέμου (m/s), ω η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα (rad/s), R η διάμετρος του ρότορα (m), $A(\gamma)$ η περιοχή στροβιλισμού της ανεμογεννήτριας (m^2), $C_p(\omega R/v, \theta)$ ο συντελεστής ισχύος και $(\omega R/v=\lambda)$ η ταχύτητα στον κορυφή του άξονα [\[15\]](#).

Εξετάζοντας την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι σε έναν πραγματικό κινητήρα, η ισχύς μπορεί να ρυθμιστεί από τη γωνία κλίσης, την ταχύτητα του δρομέα, τη γωνία εκτροπής και από διάφορες εξωγενείς παραμέτρους. Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο, ότι η πυκνότητα του αέρα που επηρεάζει την παραγωγή ενέργειας δεν είναι ίδια σε όλες τις τοποθεσίες, καθώς μειώνεται σε αυξανόμενο υψόμετρο.

Σε μια ανεμογεννήτρια ελεγχόμενης κλίσεως, ο ηλεκτρονικός ελεγκτής της ανεμογεννήτριας ελέγχει την ισχύ εξόδου δεκάδες φορές ανά δευτερόλεπτο. Όταν η ισχύς εξόδου γίνει πολύ υψηλή, στέλνει εντολή στο μηχανισμό ελέγχου ο οποίος στρέφει άμεσα τις λεπίδες σε κατεύθυνση διαφοροποιημένη από αυτή του ανέμου. Αντίστροφα, οι λεπίδες στρέφονται στην κατεύθυνση του ανέμου όταν η ισχύς του μειώνεται αισθητά.

Αναφορικά με τους κινητήρες έλεγχου κλίσεως [\[14\]](#) παρατηρούμε ότι είναι πολύ συμπαγούς σχεδίασης και τοποθετούνται στον εξωτερικό δακτύλιο κάθε λεπίδας ή εντός του δρομέα. Η παροχή ισχύος και τα σήματα ελέγχου για τον έλεγχο του συστήματος μεταφέρονται από ένα δακτύλιο ολίσθησης από το μη περιστρεφόμενο τμήμα του θαλάμου ή από ένα σταθερό άξονα πίσω από τον δρομέα. Ο δακτύλιος ολίσθησης είναι συνδεδεμένος σε μια κεντρική μονάδα ελέγχου η οποία περιλαμβάνει σφινγκήρες για τη διανομή ενέργειας και σήματα ελέγχου για την κίνηση των λεπίδων. Κάθε μονάδα κίνησης λεπίδων αποτελείται από έναν μηχανισμό που είναι υπεύθυνος για την τροφοδοσία ρεύματος σε κατάσταση διακοπής, έναν δίαυλο πεδίου, τον μετατροπέα κινητήρα και ένα σύστημα έκτακτης ανάγκης. Στην [Εικόνα 4.6](#) παρουσιάζεται το σύστημα ελέγχου κλίσεων των λεπίδων στον άξονα του ρότορα.



Εικόνα 4.6: Σύστημα ελέγχου κλίσεων των λεπίδων στον άξονα του ρότορα.

Σε περίπτωση διακοπής ρεύματος, χρησιμοποιείται λειτουργία έκτακτης ανάγκης μέσω μπαταριών ή τράπεζας πυκνωτών. Η "Maxwell Technologies" πρόσφατα εισήγαγε μια σειρά από υπερπυκνωτές οι οποίοι αποτελούν εναλλακτική λύση υψηλής αξιοπιστίας για την αποθήκευση ρεύματος. Οι υπερπυκνωτές προσφέρουν εξαιρετική απόδοση, με ευρεία κλίμακα θερμοκρασιών λειτουργίας, μεγάλη διάρκεια ζωής, εύελικτη διαχείριση και μειωμένο μέγεθος. Είναι οικονομικά αποδοτικοί και εξαιρετικά αξιόπιστοι, ιδιαίτερα όταν σχεδιάζονται με βάση την συνολική προσέγγιση του συστήματος της ανεμογεννήτριας.

4.7.2 Έλεγχος Καθυστέρησης

4.7.2.1 Ενεργής Καθυστέρησης Ελεγχόμενες Ανεμογεννήτριες

Ένας αυξανόμενος αριθμός μεγαλύτερων ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας (1 MW και άνω) αναπτύσσονται με ένα μηχανισμό που είναι γνωστός και ως ενεργής καθυστέρησης. Από τεχνικής άποψης, οι ενεργής καθυστέρησης μηχανισμοί μοιάζουν με τους μηχανισμούς ελεγχόμενης κλίσης, δεδομένου ότι έχουν λεπίδες με δυνατότητα ανύψωσης και επιπλέον για να αποκτήσουν μεγάλη ροπή σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου προγραμματίζονται να αλλάζουν την κλίση των πτερυγίων τους. Όταν όμως οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί φτάσουν στην ονομαστική του ισχύ δηλαδή όταν η γεννήτρια πρόκειται να υπερφορτωθεί τοποθετούν τα

περυγία τους στην αντίθετη κατεύθυνση κατά $3-5^\circ$ λιγότερο από τους μηχανισμούς ελεγχόμενης κλίσης. Με άλλα λόγια αυξάνεται η γωνία των περυγίων του ρότορα σπαταλώντας με αυτό τον τρόπο υπερβολική αιολική ενέργεια. Επιπρόσθετα, στους ενεργής καθυστέρησης μηχανισμούς μπορεί κανείς να ελέγξει την έξοδο ισχύος με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με τους παθητικής καθυστέρησης, έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπέρβαση της ονομαστικής ισχύος του μηχανήματος. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να λειτουργήσουν σχεδόν σε ονομαστική ισχύ με όλες τις υψηλές ταχύτητες ανέμου. Μια τυπική παθητικής καθυστέρησης ελεγχόμενη ανεμογεννήτρια θα έχει συνήθως πτώση στην ηλεκτρική ενέργεια εξόδου για υψηλότερες ταχύτητες ανέμου.

4.7.2.2 Παθητικής Ενέργειας Ελεγχόμενες Ανεμογεννήτριες

Οι παθητικής καθυστέρησης ανεμογεννήτριες έχουν τα περύγια του ρότορα βιδωμένα πάνω στον άξονα σε σταθερή γωνία. Η γεωμετρία του περυγίου του ρότορα ωστόσο έχει σχεδιαστεί αεροδυναμικά για να εξασφαλίσει ότι τη στιγμή που η ταχύτητα του ανέμου θα γίνει πολύ υψηλή, θα δημιουργήσει στροβιλισμό στην πλευρά της λεπίδας του δρομέα που δεν βλέπει προς τον άνεμο. Αυτή η στάση εμποδίζει τη δύναμη ανύψωσης της λεπίδας του ρότορα από το να επενεργεί πάνω στον δρομέα [14]. Το βασικό πλεονέκτημα των παθητικής καθυστέρησης ανεμογεννητριών είναι ότι δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη στον ίδιο τον ρότορα και ότι δεν είναι πολύπλοκο το σύστημα ελέγχου. Από την άλλη πλευρά αποτελεί ένα πολύ σύνθετο πρόβλημα αεροδυναμικής. Περίπου τα δύο τρίτα των ανεμογεννητριών που είναι εγκατεστημένες στον κόσμο είναι τύπου παθητικής καθυστέρησης.

4.7.3 Έλεγχος Εκτροπής

Ο άξονας του ρότορα ενός δρομέα μιας ανεμογεννήτριας συνήθως δεν ευθυγραμμίζεται με τον άνεμο, καθώς ο άνεμος αλλάζει συνεχώς την κατεύθυνση του. Ο στρεφόμενος ρότορας είναι λιγότερο αποδοτικός από τον μη στρεφόμενο και έτσι είναι ζωτικής σημασίας να έχει ευθυγραμμιστεί δυναμικά ο ρότορας με την κατεύθυνση του ανέμου. Επιπλέον, οι μη ευθυγραμμισμένοι ρότορες επιβάλλουν υψηλότερα φορτία στα περύγια, προκαλώντας επιπλέον ζημιά λόγω κόπωσης. Η έξοδος και οι απώλειες ισχύος μπορούν να προσεγγιστούν με τον τύπο:

$$\Delta P = a \cos(\gamma) \quad 4.2$$

όπου ΔP είναι η χαμένη ισχύς, γ η γωνία σφάλματος περιστροφής και a μια επιθυμητή σταθερά.

Για τους λόγους αυτούς, σχεδόν όλες οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα χρησιμοποιούν αναγκαστικά εκτροπή, δηλαδή μηχανισμό που χρησιμοποιεί τους ηλεκτροκινητήρες και τα κιβώτια ταχυτήτων για να κρατήσουν την τουρμπίνα στραμμένη προς τον άνεμο [15]. Ο έλεγχος εκτροπής συνήθως περιλαμβάνει αρκετούς μηχανισμούς κίνησης και κινητήρες που κατανέμουν τη φόρτωση εργαλείων.

4.8 Ηλεκτρονικά Ισχύος

Τα ηλεκτρονικά ισχύος διαδραματίζουν ιδιαίτερο ρόλο στις ανεμογεννήτριες της νέας γενιάς. Είναι περισσότερο σημαντικά στους μηχανισμούς μεταβλητής ταχύτητας, δεδομένου ότι είναι μεγαλύτερη η συχνότητα αποσύνδεσης της γεννήτριας από το δίκτυο. Ωστόσο, ακόμη και σε μηχανές σταθερής ταχύτητας, τα θυρίστορ χρησιμοποιούνται ως soft starters.

Τα ηλεκτρονικά ισχύος εξυπηρετούν δύο παράλληλους σκοπούς:

1. Την συμμόρφωση της παραγόμενης κυματομορφής ισχύος της ανεμογεννήτριας με τις απαιτήσεις δικτύου.
2. Την προστασία των στοιχείων της ανεμογεννήτριας από πιθανές βλάβες του δικτύου (πτώση τάσης ή αύξηση, κλπ.).

4.8.1 Αρμονικά Ρεύματα

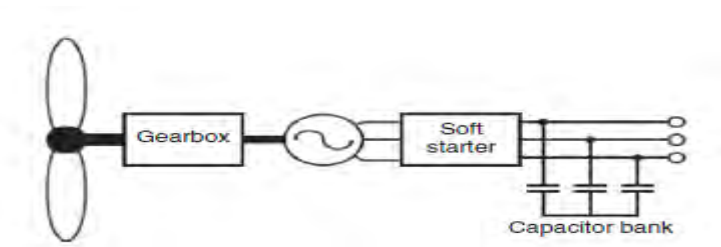
Μόνο οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας εισάγουν στο δίκτυο σημαντική ποσότητα αρμονικών ρευμάτων. Οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας, ιδιαίτερα εκείνες με πυκνωτές διόρθωσης συντελεστή ισχύος μεταβάλλουν την αρμονική σύνθετη αντίσταση του δικτύου διανομής και σε ορισμένες περιπτώσεις δημιουργούν κυκλώματα συντονισμού [14]. Αυτό μπορεί να είναι σημαντικό, εάν οι ανεμογεννήτριες σταθερής και μεταβλητής ταχύτητας εγκαθίστανται στο ίδιο αιολικό πάρκο. Αξίζει να σημειωθεί δεν έχει αναφερθεί κάποια συγκεκριμένη περίπτωση ζημιάς εξοπλισμού λόγω των αρμονικών ρευμάτων από ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας.

4.8.2 Συστήματα Σταθερής Ταχύτητας

Όπως αναφέρθηκε ήδη, τα συστήματα σταθερής ταχύτητας χρησιμοποιούν επαγωγικές γεννήτριες απευθείας συνδεδεμένες στο δίκτυο. Αυτή η διαμόρφωση υπαγορεύει την ανάγκη για χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος (Εικόνα 4.7) με δύο στόχους:

1. Ομαλή σύνδεση-αποσύνδεση από το δίκτυο.
2. Αντιστάθμιση της κατανάλωσης αέργου ισχύος χωρίς φορτίο.

Αυτές οι δύο απαιτήσεις ικανοποιούνται με τη χρήση soft starters και τράπεζας πυκνωτών.



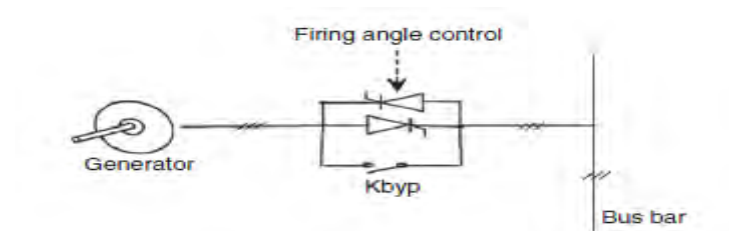
Εικόνα 4.7: Ηλεκτρονικά ισχύος σε συστήματα σταθερής ταχύτητας.

4.8.2.1 Soft Starters

Ο soft starter είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που στοχεύει στη μείωση των παροδικών ρευμάτων κατά τη σύνδεση ή την αποσύνδεση από το δίκτυο, το οποίο συμβαίνει όταν η ταχύτητα της γεννήτριας υπερβαίνει την σύγχρονη ταχύτητα [14]. Χρησιμοποιώντας τα θυρίστορ που ελέγχονται από τη γωνία πυροδότησής τους, η γεννήτρια συνδέεται ομαλά με το δίκτυο σε έναν προκαθορισμένο αριθμό περιόδων. Οι συσκευές μεταγωγής είναι δύο θυρίστορ για κάθε φάση, συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η σχέση της γωνίας πυροδότησης και της ενίσχυσης του soft-starter είναι μη γραμμική και επίσης εξαρτάται από τον συντελεστή ισχύος του συνδεδεμένου στοιχείου. Για φορτία αντίστασης, η γωνία ποικίλλει μεταξύ $0 - 90^\circ$, ενώ στην περίπτωση επαγωγικού φορτίου μεταξύ $90 - 180^\circ$.

Συνήθως, όταν η γεννήτρια είναι πλήρως συνδεδεμένη με το δίκτυο, ένα ρελέ παρακάμπτει τον soft starter για να μειώσει τις απώλειες. Με αυτό τον τρόπο, η συσκευή παράγει διάφορες αρμονικές καθώς η γωνία πυροδότησης των θυρίστορ εναλλάσσεται. Ωστόσο, επειδή χρησιμοποιούνται μόνο για μερικά δευτερόλεπτα κατά τη σύνδεση της επαγωγικής

γεννήτριας, η επίδραση των αρμονικών θεωρείται αβλαβής και μπορεί να αγνοηθεί. Στην [Εικόνα 4.8](#) παρουσιάζεται η λειτουργία ενός soft-starter.



Εικόνα 4.8: Λειτουργία soft-starter μηχανισμού

4.8.2.2 Τράπεζες Πυκνωτών

Για την αντιστάθμιση του συντελεστή ισχύος της αέργου ισχύος στη γεννήτρια, χρησιμοποιούνται τράπεζες πυκνωτών εναλλασσόμενου ρεύματος ([Εικόνα 4.9](#)). Η εναλλαγή των πυκνωτών γίνεται με βάση τον υπολογισμό της μέσης αέργου ισχύος σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Προκειμένου να μειωθεί το ρεύμα κατά τη σύνδεση - αποσύνδεση των πυκνωτών, μπορεί να συνδεθεί σε σειρά με ένα πηνίο. Στους πυκνωτές υπάρχει ο κίνδυνος υπερφόρτωσης και καταστροφής σε περίπτωση υπερτάσεων στο δίκτυο και έτσι αυξάνουν το γενικό κόστος συντήρησης των ανεμογεννητριών [14]. Οι τράπεζες πυκνωτών συνήθως τοποθετούνται στον πυθμένα του πύργου ή στον θάλαμο των ανεμογεννητριών.



Εικόνα 4.9: Υπερπυκνωτής

4.8.3 Συστήματα Μεταβλητής Ταχύτητας

Στα συστήματα μεταβλητής ταχύτητας, η γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο με την χρήση ενός ηλεκτρονικού συστήματος ισχύος. Για σύγχρονες και επαγωγικές γεννήτριες χωρίς περιστροφή του ρότορα, συνδέεται ένας μετατροπέας πλήρους ισχύος μεταξύ του στάτη της γεννήτριας και του δικτύου, όπου η συνολική παραγωγή ενέργειας πρέπει να τροφοδοτείται μέσω του ηλεκτρονικού συστήματος ισχύος. Για επαγωγικές γεννήτριες με περιστροφές του ρότορα ο στάτης της γεννήτριας συνδέεται άμεσα στο δίκτυο.

4.8.3.1 Μετατροπείς Μερικής Ισχύος

Διάφοροι σχηματισμοί έχουν χρησιμοποιηθεί για μετατροπείς μερικής ισχύος σε επαγωγικές γεννήτριες οι οποίοι περιλαμβάνουν:

- Ανορθωτή διόδου στους δακτυλίους ολίσθησης του μηχανήματος και έναν μετατροπέα με θυρίστορ. Αυτός ο σχηματισμός έχει κακό συντελεστή ισχύος και προβλήματα αρμονικής παραμόρφωσης, ενώ η λειτουργία της γεννήτριας είναι περιορισμένη μόνο σε υπερσύγχρονες ταχύτητες.
- Οι Cycloconverters που χρησιμοποιούνται σε πολύ μεγάλες ανεμογεννήτριες, οι οποίοι διασυνδέουν το κύκλωμα του δρομέα με το δίαυλο. Σε αυτή την περίπτωση, η περιοχή λειτουργίας της γεννήτριας επεκτείνεται κάτω από σύγχρονη ταχύτητα αν και η συνολική περιοχή ελέγχου της ταχύτητας περιορίζεται συνήθως στο 15% της σύγχρονης ταχύτητας. Επιπλέον, ο έλεγχος της αέργου ισχύος στην έξοδο και η βελτίωση της απόδοσης και της ροπής μπορεί να επιτευχθεί μέσω της εφαρμογής συστημάτων ελέγχου. Ωστόσο, το υψηλό κόστος και η πολυπλοκότητα των Cycloconverters καθιστούν αυτή τη λύση ακατάλληλη.

4.8.3.2 Μετατροπείς Πλήρους Ισχύος

Ο back-to-back μετατροπέας πηγής τάσης PWM (Pulse-Width-Modulation) [\[14\]](#) είναι ένας αμφίδρομος μετατροπέας ισχύος που αποτελείται από δύο συμβατικά VSI PWM. Για να επιτευχθεί πλήρης έλεγχος του ρεύματος δικτύου, η συνεχής τάση διασύνδεσης πρέπει να

ενισχυθεί σε επίπεδο υψηλότερο από το εύρος των γραμμών του δικτύου. Η ροή ισχύος του μετατροπέα δικτύου ελέγχεται προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η τάση, ενώ ο έλεγχος της γεννήτριας έχει ρυθμιστεί ώστε να ταιριάζει η ζήτηση της ταχύτητας αναφοράς. Ο PWM VSI είναι ο συχνότερα χρησιμοποιούμενος τριφασικός μετατροπέας συχνότητας. Πολλοί κατασκευαστές παράγουν εξαρτήματα ειδικά σχεδιασμένα με σκοπό την χρήση αυτού του μετατροπέα. Λόγω αυτού, το κόστος των εξαρτημάτων μπορεί να είναι χαμηλό σε σύγκριση με τους μετατροπείς που απαιτούν εξαρτήματα σχεδιασμένα για μια εξειδικευμένη παραγωγή.

Επιπλέον, ένα τεχνικό πλεονέκτημα του PWM VSI είναι η αποσύνδεση του πυκνωτή μεταξύ του μετατροπέα δικτύου και του μετατροπέα της γεννήτριας. Παρέχοντας κάποια προστασία, αυτή η αποσύνδεση προσφέρει ξεχωριστό έλεγχο των δύο μετατροπέων, επιτρέποντας τόσο την αντιστάθμιση της ασυμμετρίας στην πλευρά της γεννήτριας όσο και στην πλευρά του δικτύου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

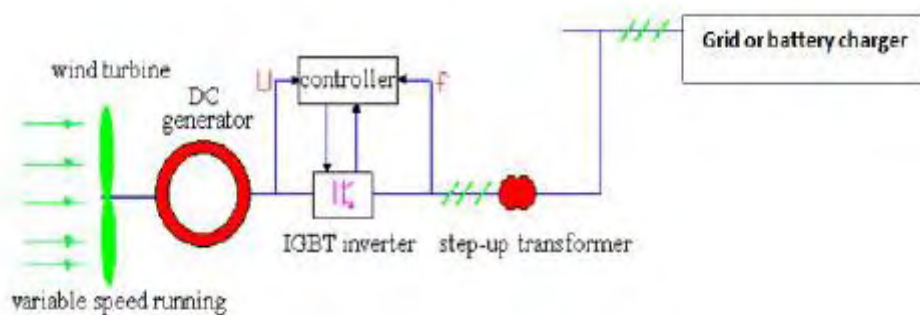
5.1 Εισαγωγή

Ένας από τους σημαντικούς παράγοντες για την σωστή και αποτελεσματική λειτουργία των ανεμογεννητριών αποτελεί η τεχνολογία των γεννητριών που χρησιμοποιούνε. Παραδοσιακά, υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες γεννητριών που χρησιμοποιούνται από τις ανεμογεννήτριες (Wind Turbine Generators - WTG). Αυτές είναι οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος (DC), οι σύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) και οι ασύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC).

5.2 Γεννήτριες Συνεχούς Ρεύματος

Σε συμβατικές μηχανές συνεχούς ρεύματος [\[16\]](#), το πεδίο βρίσκεται στον στάτη και η επαγωγή στον δρομέα. Ο στάτης περιλαμβάνει έναν αριθμό πόλων που διεγείρονται είτε από μόνιμους μαγνήτες, είτε από τις περιελίξεις του DC πεδίου. Επιπλέον, εάν το μηχανήμα είναι ηλεκτρικά διεγερμένο τείνει να ακολουθήσει την διακλάδωση της γεννήτριας. Ένα παράδειγμα του DC συστήματος γεννήτριας απεικονίζεται στην [Εικόνα 5.1](#).

Αποτελείται από τα πτερύγια, την γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, τον μετατροπέα διπολικού τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (IGBT), τον ελεγκτή, τον μετασχηματιστή και το ηλεκτρικό δίκτυο. Για τις DC διακλαδωμένες γεννήτριες, το ρεύμα πεδίου αυξάνεται με την ταχύτητα λειτουργίας, ενώ η πραγματική ταχύτητα της ανεμογεννήτριας καθορίζεται από την ισορροπία μεταξύ της ροπής κίνησης και της ροπής φορτίου. Ο ρότορας περιλαμβάνει αγωγούς τυλιγμένους επί ενός οπλισμού οι οποίοι συνδέονται με τους δακτυλίους του κινητήρα. Ωστόσο, απαιτείται τακτική συντήρηση η οποία είναι σχετικά δαπανηρή κυρίως λόγω της χρήσης των συσκευών μεταγωγής.

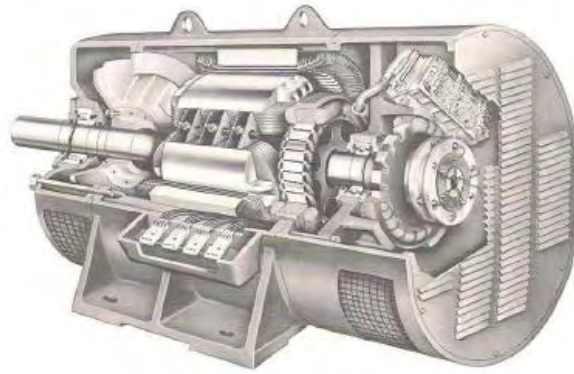


Εικόνα 5.1: Σύστημα γεννήτριας συνεχούς ρεύματος.

5.3 Σύγχρονες Γεννήτριες Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Από τα πρώτα στάδια της ανάπτυξης των ανεμογεννητριών έχουν καταβληθεί σημαντικές προσπάθειες να βελτιστοποιηθεί η απόδοση των τριφασικών σύγχρονων μηχανών. Οι σύγχρονες AC γεννήτριες μπορούν να διεγερθούν με συνεχές ρεύμα είτε από μόνιμους μαγνήτες, είτε από ηλεκτρομαγνήτες και επομένως ονομάζονται σύγχρονες γεννήτριες (Permanent Magnet Synchronous Generators - PMSG) [17] και ηλεκτρικά διεγερμένες σύγχρονες γεννήτριες (Electrically Excited Synchronous Generators - EESG), αντίστοιχα. Όταν ο ρότορας οδηγείται από την ανεμογεννήτρια, παράγεται τριφασική ισχύς στις περιελίξεις του στάτη που συνδέονται με το δίκτυο, μέσω μετασχηματιστών και μετατροπέων ισχύος. Για τις σύγχρονες γεννήτριες σταθερής ταχύτητας, η ταχύτητα του δρομέα πρέπει να διατηρείται ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα, διαφορετικά ο συγχρονισμός θα χαθεί. Στην [Εικόνα 5.2](#) παρουσιάζεται το εσωτερικό μιας συμβατικής σύγχρονης γεννήτριας.

Θεωρητικά τα χαρακτηριστικά της ενεργούς ισχύος των σύγχρονων γεννητριών μπορεί να ελεγχθούν εύκολα μέσω της διέγερσης του κυκλώματος. Ωστόσο, όταν χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες σταθερής ταχύτητας, η ταχύτητα του ανέμου έχει διακυμάνσεις και περιοδικές διαταραχές που προκαλούνται από τους φυσικούς συντονισμούς που μεταφέρονται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Επιπλέον, οι σύγχρονες γεννήτριες τείνουν να έχουν χαμηλή επίδραση απόσβεσης, έτσι ώστε να μην επιτρέπουν την απορρόφηση των μεταβατικών συνθηκών κίνησης. Όταν ενσωματώνονται στο ηλεκτρικό δίκτυο, συγχρονίζουν τη συχνότητά τους με εκείνη του δικτύου. Επιπλέον, είναι γενικά πιο περίπλοκες, δαπανηρές και πιο επιρρεπείς στα σφάλματα από τις επαγωγικές γεννήτριες.



Εικόνα 5.2: Εσωτερικό μιας σύγχρονης γεννήτριας.

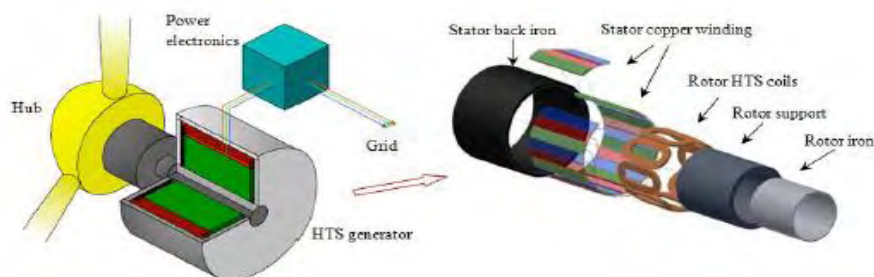
Τις τελευταίες δεκαετίες, οι PM γεννήτριες σταδιακά άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες λόγω της υψηλής πυκνότητας ισχύος και της χαμηλής τους μάζας και θεωρούνται ως η ιδανική επιλογή για μικρές ανεμογεννήτριες. Όπως φαίνεται στην [Εικόνα 5.3](#), οι μόνιμοι μαγνήτες είναι εγκατεστημένοι στον δρομέα για να παράγουν ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια λαμβάνεται από τον σπλισμό του στάτη μέσω της χρήση του εναλλάκτη και των δακτυλίων. Μερικές φορές επίσης μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα κυλινδρικό ρότορα αλουμινίου για τη μείωση του κόστους.



Εικόνα 5.3: Εσωτερικό μιας σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη.

Η αρχή της λειτουργίας των γεννητριών μονίμου μαγνήτη είναι παρόμοια με αυτή των σύγχρονων γεννητριών, εκτός από το γεγονός ότι μπορούν να λειτουργούν και ως ασύγχρονες. Τα πλεονεκτήματα των PMSGs περιλαμβάνουν την εξάλειψη του μεταγωγέα και την ολίσθηση των δακτυλίων έτσι ώστε οι μηχανές να είναι ανθεκτικές, αξιόπιστες και απλές στην κατασκευή τους. Τέλος επειδή οι πραγματικές ταχύτητες ανέμου είναι μεταβλητές, οι PMSGs δεν μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με σταθερή συχνότητα και ως αποτέλεσμα θα πρέπει να συνδεθούν στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των μετατροπέων ισχύος.

Μια πιθανή παραλλαγή των σύγχρονων γεννητριών αποτελούν οι υπεραγώγιμες γεννήτριες υψηλής θερμοκρασίας (High Temperature Superconducting - HTS) (Εικόνα 5.4). Η γεννήτρια περιλαμβάνει το σίδηρο στήριξης του στάτη, την περιέλιξη του χαλκού του στάτη, τα πηνία πεδίου HTS [18], τον πυρήνα του ρότορα, τη δομή στήριξης του δρομέα, το σύστημα ψύξης του δρομέα, το εξωτερικό ψυγείο, την ηλεκτρομαγνητική ασπίδα του άξονα και το περίβλημα. Στο σχεδιασμό της μηχανής, οι ρυθμίσεις του στάτη, του δρομέα, της ψύξης και του κιβωτίου ταχυτήτων ενδέχεται να δημιουργήσουν σημαντικά προβλήματα στην διατήρηση των πηνίων HTS σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας.



Εικόνα 5.4: Σχηματική αναπαράσταση μιας γεννήτριας HTS.

Τα υπεραγώγιμα πηνία μπορούν να μεταφέρουν 10 φορές περισσότερο ρεύμα από τα συμβατικά πηνία με σύρματα χαλκού. Χωρίς αμφιβολία, η χρήση τους εξαλείφει όλες τις απώλειες ισχύος του πεδίου και η ικανότητα της υπεραγωγιμότητας να αυξάνει την πυκνότητα ρεύματος επιτρέπει την ύπαρξη υψηλών μαγνητικών πεδίων οδηγώντας σε σημαντική μείωση της μάζας και του μεγέθους των γεννητριών. Ως εκ τούτου, οι υπεραγώγιμες γεννήτριες παρέχουν υψηλή χωρητικότητα και μείωση του βάρους. Ωστόσο,

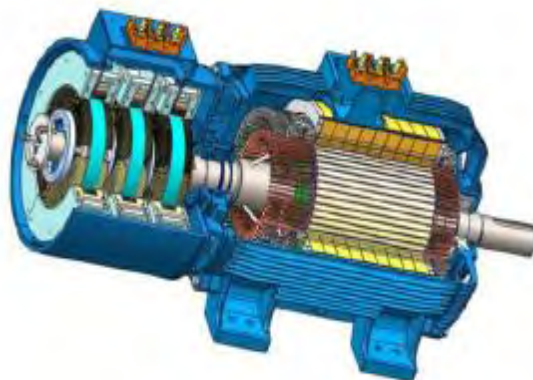
υπάρχουν πολλές τεχνικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, ιδιαίτερα όσον αφορά τη μακρόχρονη συντήρηση των ανεμογεννητριών, όπως για παράδειγμα η ανάγκη να συντηρηθούν τα κρυογονικά συστήματα, ώστε να υπάρχει χρόνος να πέσει η θερμοκρασία και να δροσιστεί η γεννήτρια.

5.4 Ασύγχρονες Γεννήτριες Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Ενώ η συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιεί σύγχρονες μηχανές, στην αιολική ενέργεια χρησιμοποιούνται επαγωγικές. Αυτές οι γεννήτριες κατηγοριοποιούνται σε δύο τύπους: στις επαγωγικές γεννήτριες σταθερής ταχύτητας (Fixed Speed Induction Generators – FSIGs ή Squirrel Cage Induction Generators - SCIGs) και στις επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας (Doubly-Fed Induction Generators - DFIG) [19] με περιστρεφόμενους δρομείς. Τα εσωτερικά μέρη των παραπάνω γεννητριών παρουσιάζονται στις [εικόνες 5.5](#) και [5.6](#) αντίστοιχα.



Εικόνα 5.5: Εσωτερικό μιας επαγωγικής γεννήτριας κλωβού.



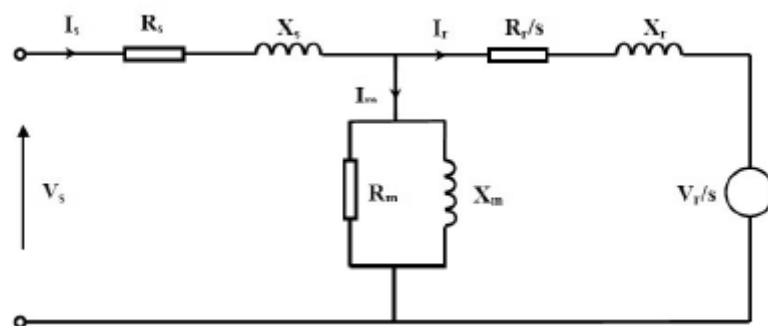
Εικόνα 5.6: Εσωτερικό μιας επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας με περιστροφικό μετασχηματιστή.

Όταν η τροφοδοσία γίνεται με τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα στον στάτη, δημιουργείται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο των αγωγών και αν ο ρότορας περιστρέφεται με ταχύτητα διαφορετική από την σύγχρονη ταχύτητα, τότε δημιουργείται ολίσθηση και ενεργοποιείται το κύκλωμα του δρομέα. Γενικά, οι επαγωγικές μηχανές είναι αξιόπιστες, φθηνές, έχουν υψηλό βαθμό απόσβεσης και είναι ικανές να απορροφούν τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του δρομέα και τις παροδικές μεταβολές του μηχανισμού μετάδοσης κίνησης. Ωστόσο, οι επαγωγικές μηχανές αντλούν άεργο ισχύ από το δίκτυο και κατά συνέπεια απαιτείται κάποιας μορφής αντιστάθμιση της ενεργούς ισχύος, όπως η χρήση πυκνωτών ή μετατροπών ισχύος. Για επαγωγικές γεννήτριες σταθερής ταχύτητας, ο στάτης συνδέεται με το δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή και ο ρότορας συνδέεται με την ανεμογεννήτρια μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων.

Οι SCIGs κατείχαν την πρωτιά στην αγορά των ανεμογεννητριών μέχρι και την έναρξη της τελευταίας χιλιετίας, όπου και θεωρήθηκαν ξεπερασμένες από τις DFIGs. Στις μέρες μας υπολογίζεται πως πάνω από το 85% των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών χρησιμοποιούν DFIGs. Στην τοπολογία των DFIG, ο στάτης είναι απευθείας συνδεδεμένος με το δίκτυο μέσω των μετασχηματιστών και ο δρομέας συνδέεται με το δίκτυο μέσω μετατροπών ισχύος PWM (Pulse-Width Modulation) οι οποίοι μπορούν να ελέγξουν το ρεύμα του ρότορα, τη συχνότητα και τη μετατόπιση της γωνίας φάσης. Τέτοιες γεννήτριες είναι ικανές να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα ολίσθησης (τυπικά $\pm 30\%$ της σύγχρονης ταχύτητας) με

αποτέλεσμα να προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή απόδοση ενέργειας, μείωση των μηχανικών φθορών και των διακυμάνσεων της ισχύος.

Ο δρομέας της DFIG συνδέεται μηχανικά με την ανεμογεννήτρια μέσω ενός συστήματος κίνησης, το οποίο μπορεί να περιέχει άξονες υψηλής και χαμηλής ταχύτητας, ρουλεμάν και κιβώτιο ταχυτήτων. Ο ρότορας τροφοδοτείται από τους αμφίδρομους μετατροπείς πηγής τάσης και έτσι η ταχύτητα και η ροπή της DFIG μπορεί να ρυθμιστεί με έλεγχο του μετατροπέα από την πλευρά του ρότορα. Ο στάτης μεταφέρει πάντα ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο, ενώ ο ρότορας μπορεί να διαμοιράσει την τροφοδοσία της αιολικής ενέργειας σε δύο κατευθύνσεις. Το τελευταίο οφείλεται στο γεγονός ότι οι μετατροπείς PWM είναι σε θέση να τροφοδοτήσουν τάση και ρεύμα σε διαφορετικές γωνίες φάσης. Στην υπερσύγχρονη λειτουργία, ο μετατροπέας του ρότορα λειτουργεί ως αντιστροφέας και ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου ως ανορθωτής. Σε αυτήν την περίπτωση, η ενεργός ισχύς ρέει από το δίκτυο στο ρότορα. Για να αναλύσουμε την απόδοση της DFIG, υιοθετούμε το αντίστοιχο κύκλωμα ανά φάση όπως φαίνεται στην [Εικόνα 5.7](#).



Εικόνα 5.7: Το ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση του DFIG [\[19\]](#).

Αναλύοντας την παραπάνω εικόνα διαπιστώνουμε ότι η DFIG διαφέρει από μια συμβατική επαγωγική μηχανή, καθώς στο κύκλωμα του δρομέα προστίθεται μια πηγή τάσης για την τροφοδοσία τάσης στο κύκλωμα.

Η μορφή της εξίσωσης για αυτό το κύκλωμα είναι:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_r/s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + j(X_s + X_m) & -jX_m \\ -jX_m & R_r/s + j(X_r + X_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad 5.1$$

Η ισχύς εισόδου P_{in} μπορεί να υπολογιστεί από την ισχύ εξόδου P_{out} και από την συνολική απώλεια ισχύος P_{loss} . Η τελευταία περιλαμβάνει την απώλεια αγωγού του στάτη P_{cu1} , την απώλεια αγωγού του δρομέα P_{cu2} , την απώλεια του πυρήνα P_{core} , την απώλεια των τριβών της ανεμογεννήτριας P_{wf} και την απώλεια του εκτρεπόμενου φορτίου P_{stray} . Μεταξύ αυτών των απωλειών, το P_{cu1} ποικίλει ανάλογα με το τετράγωνο του ρεύματος στάτη I_s ενώ το P_{cu2} διαφέρει ανάλογα με το τετράγωνο του ρεύματος του δρομέα I_r . Η απώλεια της εκτροπής του φορτίου χωρίζετε σε δύο μέρη: το P_{fun} που συμβαίνει στην πλευρά του στάτη και το P_{har} στην πλευρά του ρότορα. Έτσι, η P_{fun} είναι ανάλογη με την I_s^2 , ενώ η P_{har} είναι ανάλογη με το I_r^2 .

Η συνολική απώλεια δίνεται στη συνέχεια από την σχέση:

$$P_{loss} = 3I_s^2 (R_s + R_{fun}) + 3I_r^2 (R_r' + R_{har}) + P_{core} + P_{wf} \quad 5.2$$

Η αποτελεσματικότητα του DFIG δίνεται από την σχέση:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{3V_{out}\cos\phi_r}{6I_s(R_s + R_{fun} + R_r' + R_{har}) + 3V_{out}\cos\phi_r} \quad 5.3$$

Η αποδοτικότητα μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του ρεύματος φορτίου I_s και η συνάρτηση αυτή είναι συνεχής και μονοτονική. Κατά συνέπεια, η μέγιστη απόδοση μπορεί να βρεθεί όταν:

$$\frac{d\eta}{dI_s} = 0 \quad 5.4$$

Δηλαδή, η κατάσταση μέγιστης απόδοσης για τα DFIG δίνεται από την σχέση:

$$P_{core} + P_{wf} = P_{cu1} + P_{cu2} + P_{stray} \quad 5.5$$

Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός της μηχανής DFIG, οι απώλειες και η αποδοτικότητα της πρέπει να αντλούνται αριθμητικά ή πειραματικά. Η συνθήκη της μέγιστης απόδοσης δείχνει ότι όταν οι απώλειες που εξαρτώνται από το φορτίο εξισορροπούν τις απώλειες μεταβλητού φορτίου, η απόδοση της μηχανής μεγιστοποιείται. Στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των DFIG, είναι σημαντικό να υπάρχει ταύτιση των χαρακτηριστικών της γεννήτριας με την ειδική ταχύτητα του ανέμου, μετακινώντας το σημείο μέγιστης απόδοσης κοντά στο ονομαστικό ή λειτουργικό φορτίο.

Για λόγους ελέγχου, το μαθηματικό μοντέλο DFIG βασίζεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{cases} V_{sd} = r_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} \\ V_{sq} = r_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd} \end{cases} \quad 5.6$$

$$\begin{cases} V_{rd} = r_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \\ V_{rq} = r_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases} \quad 5.7$$

$$\begin{cases} \psi_{sd} = (L_{ls} + L_m) i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = (L_{ls} + L_m) i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases} \quad 5.8$$

$$\begin{cases} \psi_{rd} = (L_{lr} + L_m) i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} = (L_{lr} + L_m) i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad 5.9$$

Όπου r_s και r_r είναι οι αντιστάσεις του στάτη και του ρότορα σε Ω , L_{ls} και L_{lr} είναι οι αντιδράσεις του στάτη και του ρότορα σε H, L_m είναι η μαγνητική επαγωγή σε H, ω_s είναι η σύγχρονη ταχύτητα σε rad/sec, ω_r η ηλεκτρική ταχύτητα του δρομέα του DFIG και η σχέση του με την μηχανική ταχύτητα του δρομέα ω_g , είναι $\omega_r = P\omega_g$, όπου P είναι τα ζεύγη πόλων.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή δίνεται από την σχέση:

$$T_e = \frac{3}{2} PL_m(i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad 5.10$$

Τέλος, στην DFIG, η ενεργός ισχύς χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ισχύς εξόδου και η άεργος ισχύς είναι υπεύθυνη για την συμπεριφορά της στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ πρέπει να αναφερθεί ότι η DFIG απαιτεί ορισμένη ποσότητα αέργου ισχύος για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου. Σε περίπτωση συστημάτων συνδεδεμένων στο δίκτυο, η γεννήτρια αποκτά την άεργο ισχύ από το ίδιο το δίκτυο [\[19\]](#), ενώ σε περίπτωση λειτουργίας μεμονωμένων συστημάτων, η άεργος ισχύς πρέπει να παρέχεται από εξωτερικές πηγές όπως πυκνωτές ή μπαταρίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

6.1 Εισαγωγή

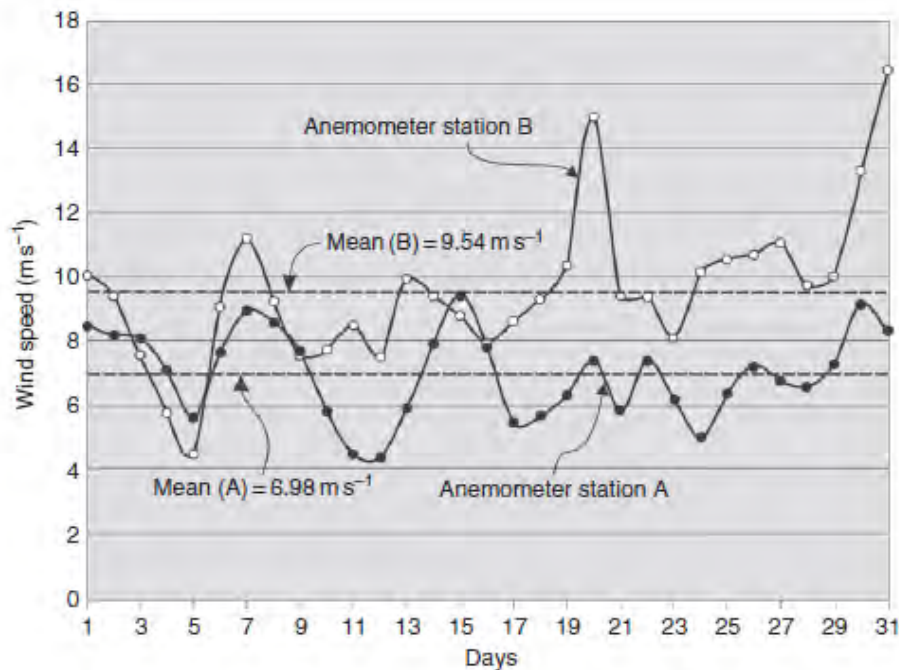
Οι παραγωγοί αιολικής ενέργειας πρέπει να είναι σε θέση να ανταποκριθούν σε μια σειρά από τεχνικές και νομικές συνθήκες προτού συνδεθούν οι ανεμογεννήτριες τους στα ηλεκτρικά δίκτυα. Ωστόσο, επί του παρόντος δεν υπάρχει ομοφωνία για τις ειδικές συνθήκες που πρέπει να πληρούνται, καθώς οι απαιτήσεις ποικίλλουν σημαντικά από χώρα σε χώρα. Αξιολογούνται διάφορες παράμετροι όπως τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης, η ενεργειακή απόδοση και ο συντελεστής χωρητικότητας της εγκατάστασης. Οι τεχνικές απαιτήσεις γενικά επικεντρώνονται στις συσκευές που πρέπει να πραγματοποιήσουν τη σύνδεση και την αποσύνδεση των ανεμογεννητριών από και προς το δίκτυο καθώς και στο σύστημα προστασίας.

Υπάρχουν απαιτήσεις και όσον αφορά τα όρια του συντελεστή ισχύος στα οποία θα πρέπει να λειτουργούν οι ανεμογεννήτριες, καθώς και για το ποσό της χωρητικότητας της αιολικής ενέργειας που μπορεί να αντέξει η εγκατάσταση, χωρίς να αποσυνδεθεί από το δίκτυο λόγω των διαταραχών της τάσης που προκαλούνται από τα βραχυκυκλώματα [\[20\]](#). Παράλληλα πρέπει να τηρούνται ορισμένες προϋποθέσεις σχετικά με τη συμβολή των ανεμογεννητριών στη συχνότητα και την τάση έλεγχου. Δηλαδή, οι ανεμογεννήτριες υποχρεούνται να συμμετέχουν στον κύριο και δευτερεύοντα έλεγχο συχνότητας, με τρόπο ίδιο με αυτό της συμβατικής τεχνολογίας, πράγμα ιδιαίτερα δύσκολο λόγω της δεδομένης μεταβλητής φύσης του ανέμου.

6.2 Διακύμανση της Αιολικής Ενέργειας

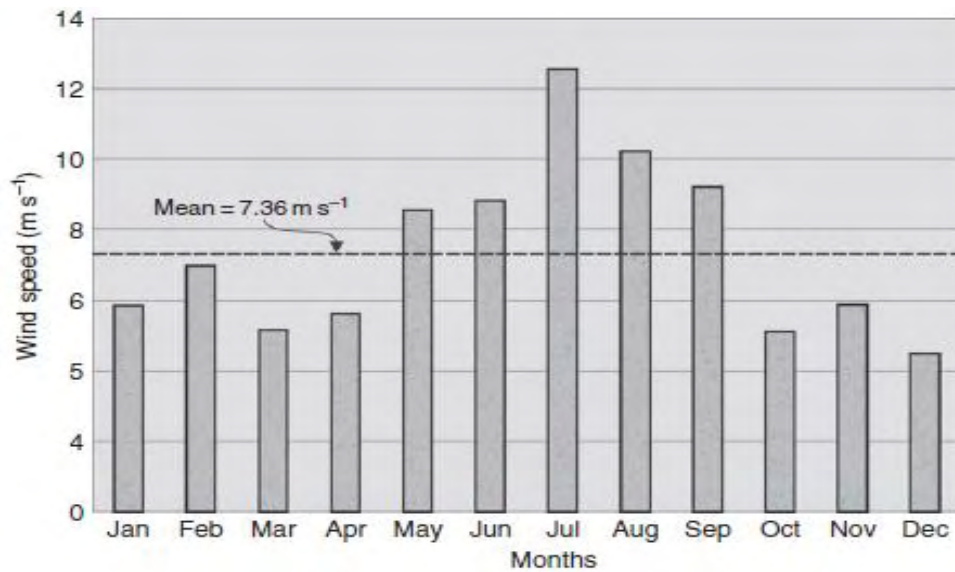
Η συμπεριφορά του ανέμου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωγραφική θέση στην οποία γίνεται η ανάλυση. Λόγω των χαρακτηριστικών του εδάφους, η ταχύτητα του ανέμου σε μια περιοχή μπορεί να διαφέρει κατά πολύ από εκείνη μιας άλλης περιοχής που βρίσκεται σε

μικρή απόσταση από την πρώτη [21]. Στην [Εικόνα 6.1](#) για παράδειγμα έχουμε τη μεταβολή των ημερήσιων μέσων ταχυτήτων του ανέμου κατά τη διάρκεια του Αυγούστου, σε δύο σταθμούς μέτρησης στο νησί Γκραν Κανάρια της Ισπανίας, που έχουν εγκατασταθεί σε ύψος 10 μέτρων πάνω από το επίπεδο του εδάφους και χωρίζονται από απόσταση περίπου 34 χλμ. Η μέση ταχύτητα ανέμου για το συγκεκριμένο μήνα διαφέρει περίπου κατά 36,6%.



Εικόνα 6.1: Μέση εξέλιξη της ταχύτητας του ανέμου σε σταθμό μέτρησης, στο Κανάριο Αρχιπέλαγος κατά την διάρκεια μιας τυχαίας μέρας [21].

Σημαντικές αλλαγές μπορούν επίσης να παρατηρηθούν από τη μια εποχή στην άλλη και από τον ένα μήνα στο άλλο, κατά τη διάρκεια του ίδιου έτους. Η [Εικόνα 6.2](#) δείχνει τη μηνιαία μεταβολή ανέμου σε σταθμό μέτρησης στο νησί Γκραν Κανάρια. Συμπεραίνουμε πώς δεδομένης τη γεωγραφική του θέσης, η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ υψηλή κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, όπου υπάρχουν και μεγαλύτερες ενεργειακές ανάγκες.



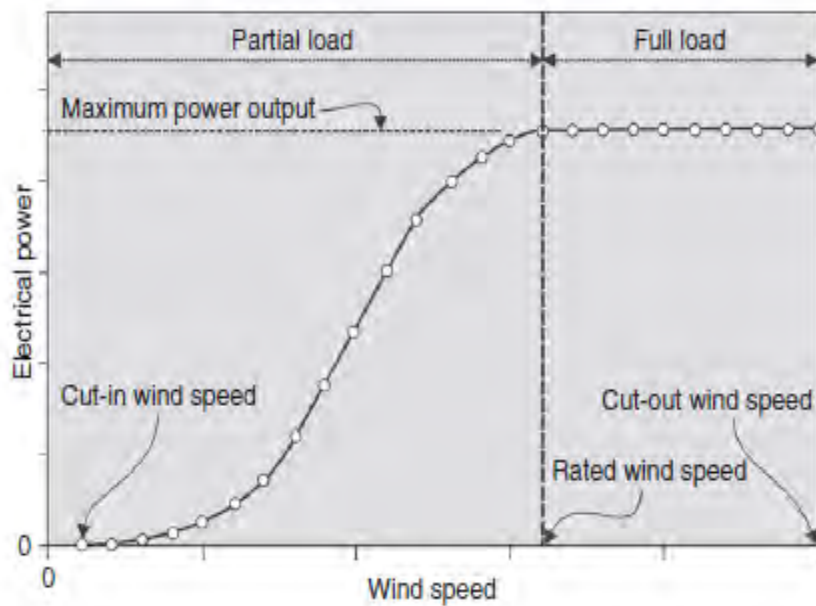
Εικόνα 6.2: Μηνιαία μεταβολή του ανέμου σε σταθμό μέτρησης στο νησί Γκραν Κανάρια [\[21\]](#).

6.3 Επίδραση των Αιολικών Πηγών στην Διακύμανση της Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ισχύς που παράγει μια ανεμογεννήτρια από τον άνεμο εξαρτάται από την πυκνότητα του αέρα, την περιοχή σάρωσης του ρότορα, τον συντελεστή ισχύος αλλά και από το σύστημα μεταφοράς ισχύος [\[20\]](#). Υπάρχουν διάφορα συστήματα ελέγχου τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα συστήματα μετατροπής αιολικής ενέργειας. Η παρέμβαση αυτών των συστημάτων ελέγχου επιτρέπει την ρύθμιση της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από την ανεμογεννήτρια.

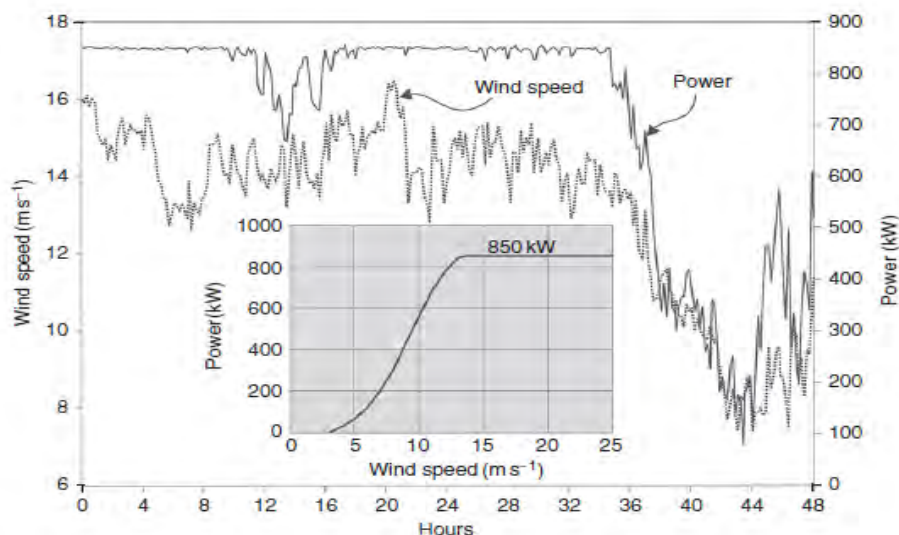
Στην [Εικόνα 6.3](#) παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη ισχύος για μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια με ρυθμιζόμενη κλίση, η οποία αντιπροσωπεύει τη μέση απόδοση της ανεμογεννήτριας. Οι ταλαντώσεις και οι αποκλίσεις από τις μέσες τιμές εμφανίζονται σε περίπτωση σημαντικών διακυμάνσεων της αιολικής ενέργειας. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι περιοχές διαφοροποιημένης ισχύος. Η μία περιοχή βρίσκεται μεταξύ της ελάχιστης ταχύτητας κίνησης της ανεμογεννήτριας (Cut-in wind speed) και της ταχύτητας πλήρους λειτουργίας της ανεμογεννήτριας (Rated wind speed) και η άλλη μεταξύ της ταχύτητας πλήρους λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και της ταχύτητας επιβράδυνσης της ανεμογεννήτριας (Cut-out wind speed). Όταν η ανεμογεννήτρια λειτουργεί στο πρώτο τμήμα της καμπύλης ισχύος της, θεωρείται ότι εργάζεται στην περιοχή μερικού φορτίου, ενώ στην

περιοχή της ταχύτητας πλήρους λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, η ηλεκτρική γεννήτρια θα παράξει τη μέγιστη ισχύ εξόδου. Σε περίπτωση υπέρβασης της ταχύτητας πλήρους λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, τότε το μηχάνημα θεωρείται ότι λειτουργεί την περιοχή πλήρους φορτίου και εάν η ταχύτητα ανέμου υπερβεί την ταχύτητα επιβράδυνσης της ανεμογεννήτριας για μερικά δευτερόλεπτα, τότε η ανεμογεννήτρια σταματά και επομένως δεν παράγει ενέργεια.



Εικόνα 6.3: Τυπική καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας [21].

Η [Εικόνα 6.4](#) δείχνει την ισχύ που παράγει μια ανεμογεννήτρια σε αιολικό πάρκο του Κανάριου Αρχιπελάγους για περίοδο 2 ημερών. Από την εικόνα συμπεραίνουμε το γεγονός ότι οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή μερικού φορτίου μιας ανεμογεννήτριας, μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες διακυμάνσεις της ηλεκτρικής ισχύος. Στην περιοχή πλήρους φορτίου, η καμπύλη ισχύος εμφανίζει μια σταθερή μέση απόδοση και δεν επηρεάζεται πολύ από τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου.



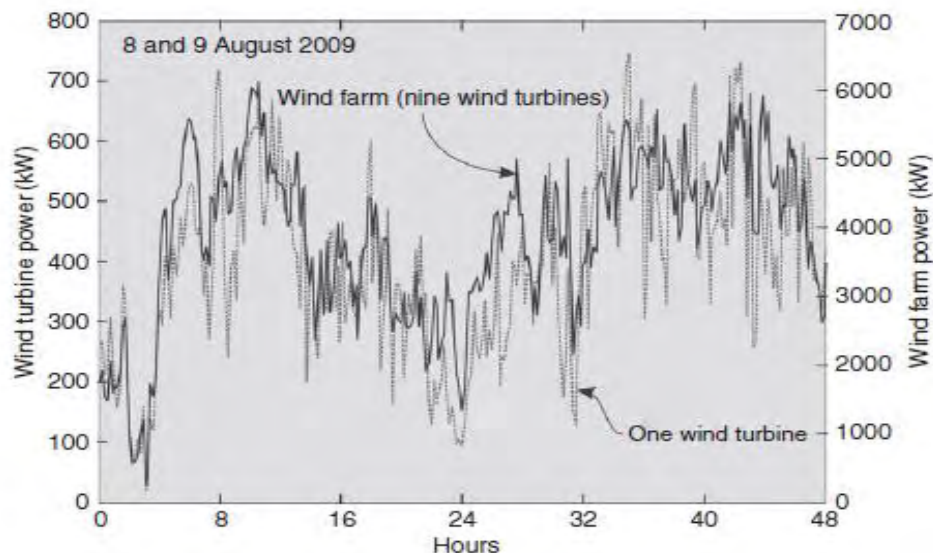
Εικόνα 6.4: Μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια σε διάστημα 2 ημερών σε αιολικό πάρκο του Κανάριου Αρχιπελάγους [21].

Η χρονική κλίμακα της διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου έχει σημαντική επίδραση στη μεταβολή της ισχύος της ανεμογεννήτριας. Αν οι διακυμάνσεις της αιολικής ενέργειας αναλυθούν σε μια συγκεκριμένη περιοχή, μπορεί να διαπιστώσει κανείς πώς η κινητική ενέργεια του ανέμου κατανέμεται ως συνάρτηση της μεταβολής της συχνότητας της αιολικής ενέργειας. Οι αιολικές διακυμάνσεις που εμφανίζονται σε κλίμακα δευτερολέπτων ή λεπτών μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές αποκλίσεις στην ισχύ εξόδου μιας μεμονωμένης ανεμογεννήτριας σε σχέση με τη μέση τιμή της. Αυτές οι ραγδαίες διακυμάνσεις στην ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια, μπορεί να οδηγήσουν σε αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα της παραγόμενης ενέργειας και επομένως στο ηλεκτρικό σύστημα στο οποίο είναι συνδεδεμένη η ανεμογεννήτρια.

6.4 Επίδραση της Διασύνδεσης των Ανεμογεννητριών στην Διακύμανση της Αιολικής Ενέργειας

Οι διακυμάνσεις στην ισχύ εξόδου μιας ανεμογεννήτριας είναι δυνατό να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα στην ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς η ενέργεια που παράγεται από κάθε είδος ανεμογεννήτριας έχει και μια διαφορετική συχνότητα, με αποτέλεσμα να δημιουργείται θέμα ποιότητας ισχύος. Συνεπώς προκύπτει

ζήτημα ομαλοποίησης των διακυμάνσεων της ισχύος εξόδου. Η [Εικόνα 6.5](#) δείχνει την ισχύ εξόδου ενός αιολικού πάρκου εγκατεστημένου στο Κανάριο Αρχιπέλαγος για περίοδο 2 ημερών. Το αιολικό πάρκο είχε εννέα ανεμογεννήτριες και η διακύμανση ισχύος κατά την περίοδο αυτή ήταν της τάξης του 31%, ενώ η μεγαλύτερη τιμή της άγγιξε το 39%.



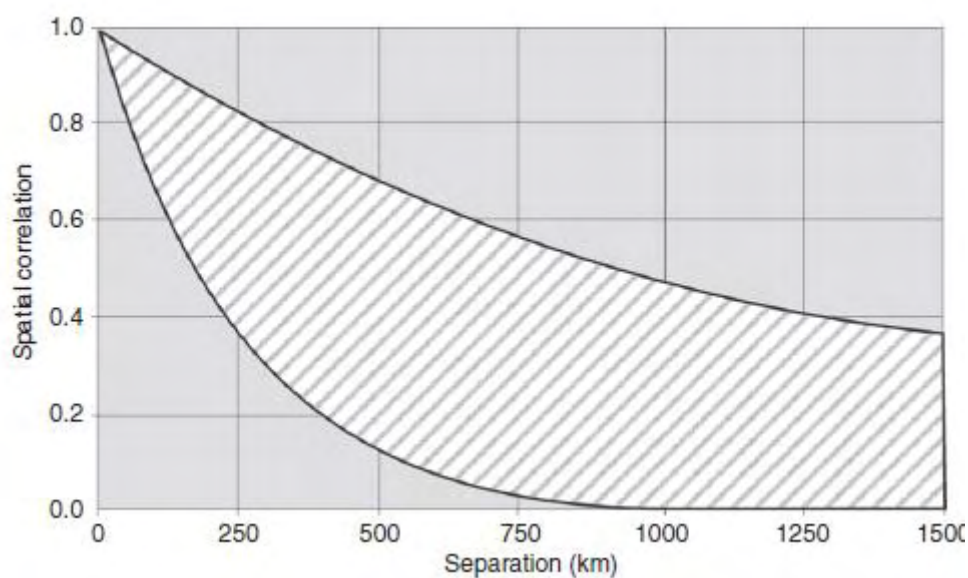
Εικόνα 6.5: Η ισχύς εξόδου ενός αιολικού πάρκου στο Κανάριο Αρχιπέλαγος για περίοδο 2 ημερών.

Ο βαθμός της εξομάλυνσης των μεταβολών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των ανεμογεννητριών που είναι εγκατεστημένες στο αιολικό πάρκο και από τον συσχετισμό μεταξύ των ταχυτήτων του ανέμου που έρχονται σε επαφή με τους δρομείς των ανεμογεννητριών. Επίσης, εξαρτάται από την μορφολογία του εδάφους της πλατφόρμας όπου είναι εγκατεστημένο το αιολικό πάρκο, καθώς και από την απόσταση που έχουν οι ανεμογεννήτριες μεταξύ τους.

6.5 Επίδραση της Γεωγραφικής Κατανομής των Αιολικών Πάρκων στην Διακύμανση της Αιολικής Ενέργειας

Μελέτες έδειξαν ότι οι ταχύτητες του ανέμου που καταγράφηκαν σε γεωγραφικές τοποθεσίες όπου υπήρχαν αιολικά πάρκα εγκατεστημένα, επηρεάζονταν από την μεταξύ τους απόσταση.

Δηλαδή αν η απόσταση μεταξύ των τοποθεσιών αυξανόταν, τότε ο βαθμός συσχέτισης των ταχυτήτων μειωνόταν ([Εικόνα 6.6](#)). Όταν η γεωγραφική απόσταση είναι μεγάλη, οι άνεμοι μπορούν να επηρεαστούν από διάφορα μικροκλιματικά χαρακτηριστικά, δηλαδή σε πολύ μεγάλες αποστάσεις οι ταχύτητες ανέμου μπορούν να είναι πρακτικά ασυσχέτιστες μεταξύ τους [\[22\]](#). Συνεπώς, η σωστή γεωγραφική κατανομή των αιολικών πάρκων σε μια ευρεία περιοχή μπορεί να συνεπάγεται αξιοσημείωτη εξομάλυνση των διακυμάνσεων της ισχύος στα διασυνδεδεμένα δίκτυα.



Εικόνα 6.6: Μείωση της γραμμικής συσχέτισης των ταχυτήτων, καθώς η απόσταση μεταξύ των αιολικών πάρκων αυξάνεται [\[21\]](#).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

7.1 Εισαγωγή

Η ποιότητα της τάσης που παράγεται από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να διαταραχθεί από διάφορα σφάλματα που μπορεί να εμφανιστούν στο δίκτυο, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται και η σωστή λειτουργία των συστημάτων παραγωγής αιολικής ενέργειας. Παρομοίως, ο τύπος της τεχνολογίας που χρησιμοποιούν μερικές ανεμογεννήτριες, η ευμετάβλητη φύση του ανέμου καθώς και άλλοι παράγοντες, μπορεί να οδηγήσουν σε διακυμάνσεις της συχνότητας, σε ανισορροπία της φάσης της τάσης και σε κάθε είδους διαταραχές οι οποίες έχουν σημαντικές επιπτώσεις στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

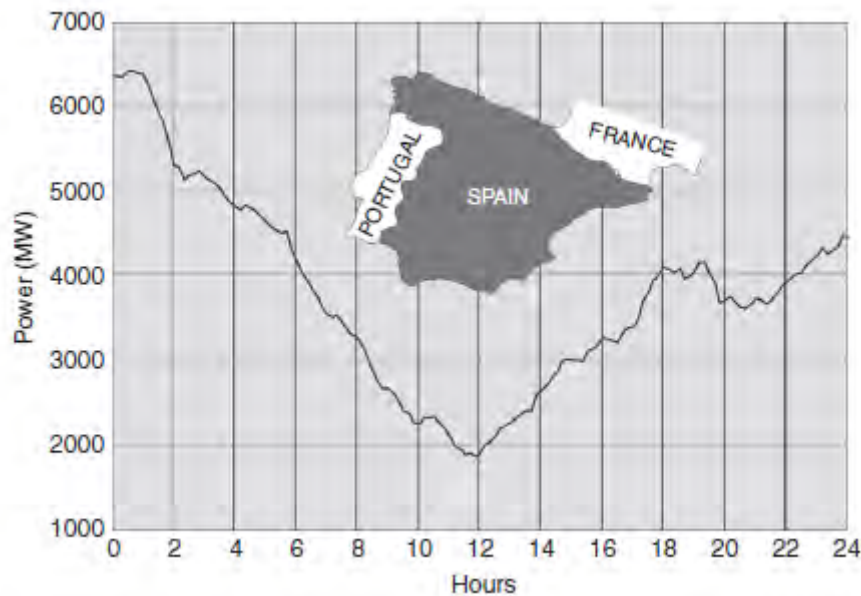
7.2 Διακυμάνσεις της Συχνότητας

Οι διακυμάνσεις στην συχνότητα ενός ηλεκτρικού συστήματος προκαλούνται κυρίως από τις μεταβολές της ισορροπίας μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης. Αυτού του είδους οι ανισορροπίες διορθώνονται με την λειτουργία συμβατικών ηλεκτρικών συστημάτων, μέσω της ιεραρχικής παρέμβασης των συστημάτων ελέγχου. Παράλληλα, οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου προκαλούν διακυμάνσεις στην παραγωγή ενεργού ισχύος από τις ανεμογεννήτριες ([Εικόνα 7.1](#)) και επομένως η συμπεριφορά της ενεργούς ισχύος που παράγεται τα από αιολικά πάρκα διαφέρει από την τυπική συμπεριφορά της ενεργούς ισχύος που παράγεται από τις συμβατικές γεννήτριες [\[21\]](#).

Οι διακυμάνσεις της ισχύος που παράγεται από αιολικά πάρκα επηρεάζουν τη συχνότητα του συστήματος με διάφορους τρόπους ανάλογα με το μέγεθος του ηλεκτρικού συστήματος και το επίπεδο διεύθυνσης του ανέμου. Υπό αυτή την έννοια, οι διαταραχές μπορούν να προέρχονται από τη λειτουργία των ηλεκτρονικών συσκευών ισχύος, τις αλλαγές στην περιστροφική ταχύτητα των ανεμογεννητριών κλπ.

Υπάρχουν αρκετά μέτρα που συνήθως υιοθετούνται για την αποφυγή αυτών των διακυμάνσεων της συχνότητας, όπως η αύξηση της εφεδρικής χωρητικότητας, η χρήση

συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και η θέσπιση περιορισμών στα επίπεδα διείσδυσης του ανέμου.



Εικόνα 7.1: Μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος κατά την διάρκεια μια μέρας, λόγω της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο της Ισπανίας [21].

7.3 Διακυμάνσεις της Τάσης

Οι διακυμάνσεις στην τάση μπορούν να προκληθούν όταν υπάρχουν μεταβολές στην ισχύ που εισάγεται ή καταναλώνεται από τα αιολικά πάρκα, προκειμένου να υπάρξει διασύνδεση του δικτύου με τον εκάστοτε κόμβο σύνδεσης. Το μέγεθος αυτών των διακυμάνσεων της τάσης θα εξαρτηθεί από την τεχνολογία, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών και τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου.

Όσο ασθενέστερο είναι το δίκτυο στον κόμβο σύνδεσης της ανεμογεννήτριας, τόσο μεγαλύτερα θα είναι τα επίπεδα διακύμανσης της τάσης. Οι ανεμογεννήτριες που διαθέτουν σύγχρονες γεννήτριες και είναι συνδεδεμένες με τα ηλεκτρικά δίκτυα μπορούν να ελέγξουν την άεργο ισχύ μέσω της διέγερσης της γεννήτριας. Επίσης, είναι συνήθως εξοπλισμένες με συγκεκριμένες συσκευές για τη ρύθμιση του συντελεστή ισχύος. Κάθε χώρα έχει τους δικούς της κανονισμούς που καθορίζουν τις ελάχιστες τιμές του συντελεστή ισχύος για τις εγκαταστάσεις. Οι ρυθμιστές του συντελεστή ισχύος παρέχουν με ελεγχόμενο τρόπο την

άεργο ισχύ που χρειάζεται η ανεμογεννήτρια. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν τράπεζες πυκνωτών για το σκοπό αυτό, όπως επίσης είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί και η τεχνολογία FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems – Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος).

7.4 Τρεμόπαιγμα της Τάσης

Το τρεμόπαιγμα της τάσης προέρχεται από την επίδραση των μεταβολών της ηλεκτρικής τάσης στους λαμπτήρες πυρακτώσεως και σε άλλες ηλεκτρικές συσκευές φωτισμού. Οι τύποι των συσκευών που συνήθως προκαλούν το φαινόμενο του τρεμοπαίγματος της τάσης στα συστήματα μεταφοράς και διανομής ισχύος είναι οι κινητήρες υψηλής ισχύος και οι μηχανές συγκόλλησης υψηλής ισχύος. Επίσης, μπορεί να προκληθεί από ανεμογεννήτριες [\[23\]](#), τόσο κατά την κανονική λειτουργία, όσο και κατά τη διάρκεια της σύνδεσης.

Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, οι διακυμάνσεις της ισχύος της ανεμογεννήτριας οφείλονται στην διαταραχή της ταχύτητας του ανέμου και επομένως λόγω των διακυμάνσεων της ροπής, ο βαθμός του τρεμοπαίγματος σε ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας που είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο, είναι υψηλότερος από εκείνον των ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας. Η συνολική επίδραση του τρεμοπαίγματος της τάσης σε ένα αιολικό πάρκο συνήθως μειώνεται με την διασύνδεση μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών. Για την μείωση αυτών των διαταραχών οι ανεμογεννήτριες μπορούν να εξοπλιστούν με ειδικές διατάξεις όπως αυτή των στατικών αντισταθμιστών.

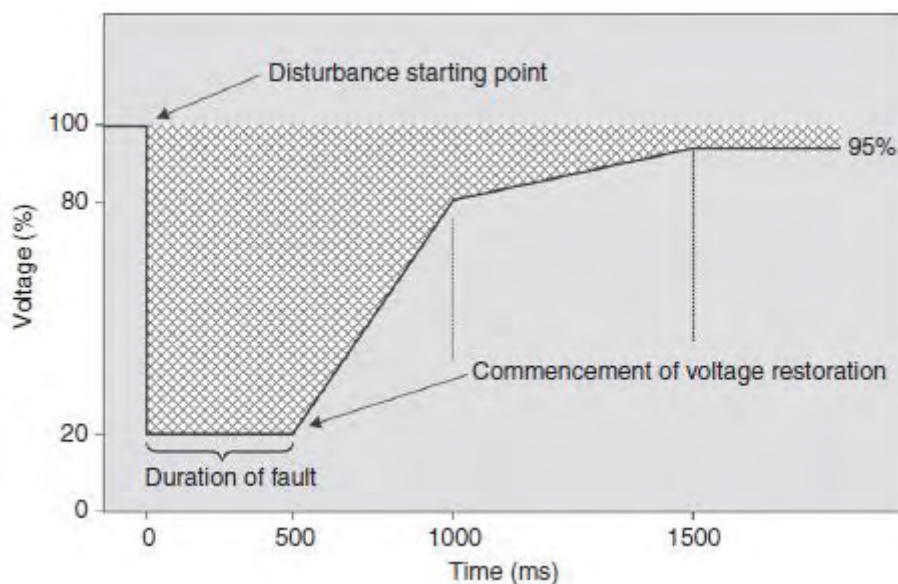
7.5 Ανισορροπία Φάσης της Τάσης

Ανισορροπία σε ένα τριφασικό σύστημα είναι μια κατάσταση στην οποία οι πραγματικές τιμές των τριών τάσεων διαφέρουν είτε στο εύρος των τιμών, είτε στις γωνίες φάσης τους κατά 120° . Επίσης, θεωρείται ότι προκύπτει ως συνέπεια της σύνδεσης μονοφασικών φορτίων σε χαμηλής, μέσης ή και υψηλής τάσης δίκτυο. Οι ανισορροπίες μπορούν να προκαλέσουν υπερβολική θέρμανση των γεννητριών, ως αποτέλεσμα των μη ομαλών ρευμάτων που κυκλοφορούν στις περιελίξεις και μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές απώλειες στην παραγωγή, ενώ παράλληλα να επηρεάσουν και τα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος των ανεμογεννητριών.

7.6 Απότομες Βουτιές και Άνοδοι της Τάσης

Απότομη βουτιά και άνοδος για την τάση θεωρείται το απότομο βύθισμα της τάσης (π.χ. από το 90% στο 1%) τροφοδοσίας σε μία ή περισσότερες φάσεις και η άμεση ανάκτηση της τάσης λίγο αργότερα. Απότομες πτώσεις τάσης με διάρκεια μικρότερη από μισό κύκλο δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι αλλάζουν την πραγματική τιμή της τάσης και συνεπώς πρόκειται για μεταβατικό φαινόμενο.

Οι βυθίσεις των τάσεων [\[21\]](#) προκαλούνται συνήθως από σφάλματα δικτύου και από μεταγωγές φορτίων. Οι κανονισμοί λειτουργίας που καθορίζονται από διάφορες χώρες απαιτούν να μην πραγματοποιείται καμία αποσύνδεση αιολικής εγκατάστασης για βυθίσεις τάσης στο σημείο σφαλμάτων ([Εικόνα 7.2](#)). Δεν μπορεί επίσης να υπάρξει κατανάλωση ενεργού ή αέργου ισχύος στο σημείο εγκατάστασης, ενώ πραγματοποιούνται εργασίες συντήρησης για το σφάλμα, ούτε κατά τη διάρκεια της περιόδου της ανάκτησης της τάσης μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.



Εικόνα 7.2: Συμπεριφορά της τάσης διαφυγής [\[21\]](#).

Απαραίτητα μέτρα σχεδιασμού και ελέγχου πρέπει να λαμβάνονται στις εγκαταστάσεις, ώστε να αποφεύγεται η αποσύνδεση των ανεμογεννητριών στιγμιαία κατά τη διάρκεια των βουτιών της τάσης. Ένα μέτρο θα μπορούσε να είναι η εγκατάσταση στατικών αντισταθμιστών (Static Synchronous Compensator - STATCOM), στον κόμβο όπου εισάγεται η παραγόμενη ενέργεια των αιολικών πάρκων. Με αυτόν τον τρόπο, η πιθανότητα αποτυχίας λειτουργίας των εξαρτημάτων που βρίσκονται μεταξύ του αιολικού πάρκου και του υποσταθμού όπου γίνεται η σύνδεση μειώνεται.

Η απότομη άνοδος των τάσεων μπορεί να παρουσιάσει ταλαντευόμενη συμπεριφορά αν και τυπικά διαρκεί λιγότερο από μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου. Μπορεί να προκληθεί από το άνοιγμα ή το κλείσιμο του διακόπτη, από τις ατμοσφαιρικές εκκενώσεις, ή από την ενεργοποίηση μιας τράπεζας πυκνωτών. Τέτοιου είδους άνοδοι μπορούν επίσης να προκληθούν και από τους αιολικούς σταθμούς ως αποτέλεσμα διακοπών και εκκινήσεων της λειτουργίας των ανεμογεννητριών. Ανάλογα με το μέγεθος και τη διάρκεια της ανόδου της τάσης, μπορεί να επηρεαστεί η λειτουργία των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος, εάν δεν είναι εξοπλισμένες με συσκευές προστασίας από την υπέρταση.

7.7 Αρμονικά

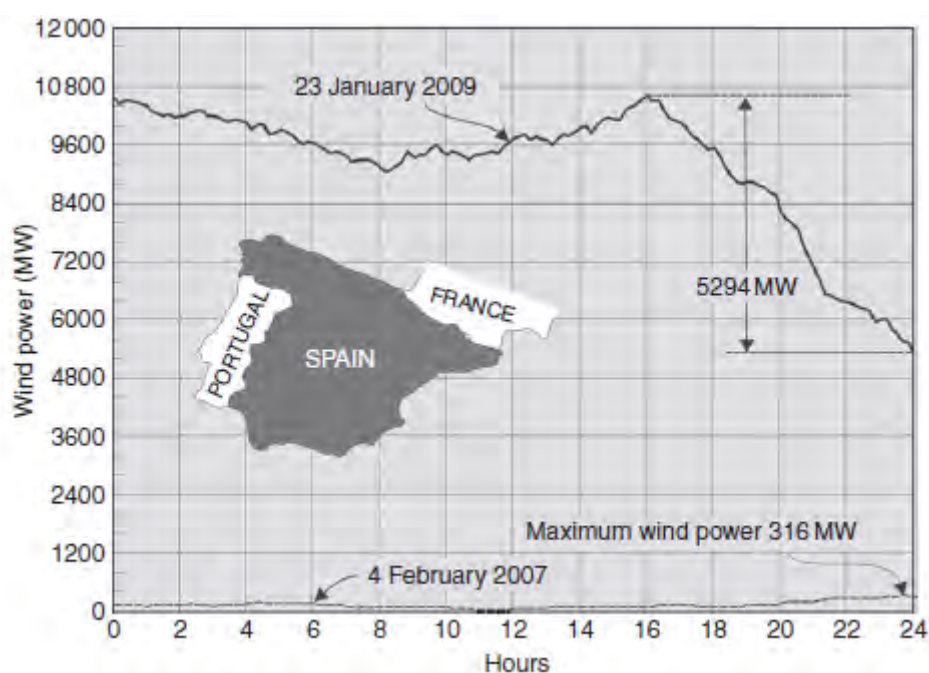
Τα αρμονικά είναι αλλοιώσεις των ημιτονοειδών κυμάτων της τάσης και του ρεύματος των ηλεκτρικών συστημάτων. Τα παραμορφωμένα κύματα έχουν συχνότητα πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας με την οποία έχει σχεδιαστεί το σύστημα (συνήθως 50 ή 60 Hz). Οι αρμονικές παραμορφώσεις οφείλονται σε μη γραμμικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού και των φορτίων του ηλεκτρικού συστήματος.

Η παράμετρος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του βαθμού παραμόρφωσης κυματομορφής ονομάζεται ολική αρμονική παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion - THD). Οι συσκευές που διαθέτουν μετατροπείς ισχύος αποτελούν πηγή υψηλής συχνότητας αρμονικών ρευμάτων. Τα αρμονικά [\[21\]](#) μπορούν να προκαλέσουν λανθασμένη λειτουργία των προστατευτικών διατάξεων, να δημιουργήσουν παρεμβολές στα κυκλώματα επικοινωνίας και να προκαλέσουν συντονισμούς στα συστήματα αιολικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας δεν είναι επιρρεπείς στην πρόκληση σημαντικών

αρμονικών σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας, οι οποίες προκαλούν τα αρμονικά λόγω των ηλεκτρονικών μετατροπών που έχουν.

7.8 Επιπτώσεις της Αιολικής Ενέργειας στην Παραγωγή Εφεδρικής Χωρητικότητας

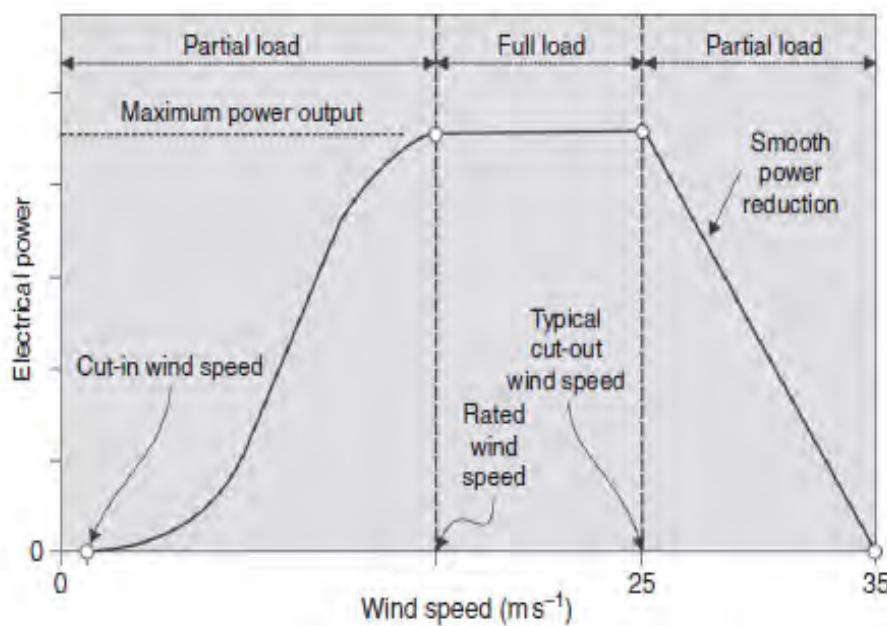
Για υψηλά επίπεδα διείσδυσης του ανέμου, η επίδραση των διακυμάνσεων του καθαρού φορτίου μπορεί να είναι σημαντική, με αποτέλεσμα να πρέπει να γίνουν αλλαγές στο ηλεκτρικό σύστημα για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία του. Δηλαδή, λόγω της μεταβαλλόμενης φύσης της αιολικής ενέργειας πρέπει σε κάθε χρονική στιγμή να υπάρχουν επαρκή αποθέματα πρόσθετης ισχύος από άλλες πηγές ενέργειας ή από συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Στην [Εικόνα 7.3](#) παρουσιάζεται η παραγωγή αιολικής ενέργειας στο ισπανικό ηπειρωτικό σύστημα στις 4 Φεβρουαρίου του 2007 κατά την οποία σημειώθηκαν μικρής έκτασης άνεμοι, ενώ γίνεται και η σύγκριση με τις 23 Ιανουαρίου 2009, όπου η ένταση των ανέμων ήταν σαφώς μεγαλύτερη.



Εικόνα 7.3: Διακύμανση της ηλεκτρικής ισχύος, παραγόμενη από αιολικά πάρκα στο ηπειρωτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Ισπανίας, στις 4 Φεβρουαρίου 2007 και στις 23 Ιανουαρίου 2009 [\[21\]](#).

Τα αιολικά πάρκα ενδέχεται να μην είναι σε θέση να παράγουν ενέργεια κατά τη διάρκεια ήρεμων ή θυελλωδών περιόδων, σε περιοχές με δίκτυα μικρού ή μεσαίου μεγέθους. Αυτές οι περίοδοι μπορούν να προγραμματιστούν σε κάποιο βαθμό, αλλά οι συνθήκες υπό τις οποίες π.χ. μια καταιγίδα αναπτύσσεται, είναι ανάγκη να αναλυθεί διεξοδικότερα ώστε να προβλεφθούν οι επιπτώσεις της στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τον μεγαλύτερο βαθμό ακρίβειας.

Ορισμένοι κατασκευαστές ανεμογεννητριών έχουν τροποποιήσει τις στρατηγικές ελέγχου τους, έτσι ώστε να αποφεύγονται οι απότομες διακοπές λειτουργίας, προκειμένου να μειωθούν οι επιπτώσεις από την μεταβλητότητα του ανέμου. Δηλαδή αν η ταχύτητα του ανέμου αυξηθεί δραστικά, η ανεμογεννήτρια απλά μειώνει την ισχύ της μέχρι να μειωθεί η ταχύτητα του ανέμου και στην συνέχεια αρχίζει να λειτουργεί και πάλι με την μέγιστη δυνατή ισχύ (Εικόνα 7.4).



Εικόνα 7.4: Καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας, τροποποιημένη με σκοπό την μείωση της απότομης πτώσης ισχύος κατά τις περιόδους των ιδιαίτερα υψηλών ταχυτήτων του ανέμου [21].

Το επιπλέον ποσό της απαραίτητης αποθεματικής χωρητικότητας εξαρτάται από την ακρίβεια των εργαλείων πρόβλεψης, από τον βαθμό συσχέτισης που υπάρχει ανάμεσα στην ζήτηση και την παραγωγή, όπως επίσης και από τις επιδράσεις της συσσώρευσης και της

διασποράς των αιολικών πάρκων. Η κατανομή και η χρήση των αποθεμάτων ισχύος ως συνέπεια της μεταβλητότητας του ανέμου οδηγεί σε πρόσθετα κόστη. Αυτά τα κόστη εξαρτώνται μεταξύ άλλων και από τον τύπο της μονάδας παραγωγής που χρησιμοποιείται για την κάλυψη της υπηρεσίας ελέγχου.

7.9 Επιπτώσεις της Αιολικής Ενέργειας στις Ανάγκες Αποθήκευσης της Ενέργειας

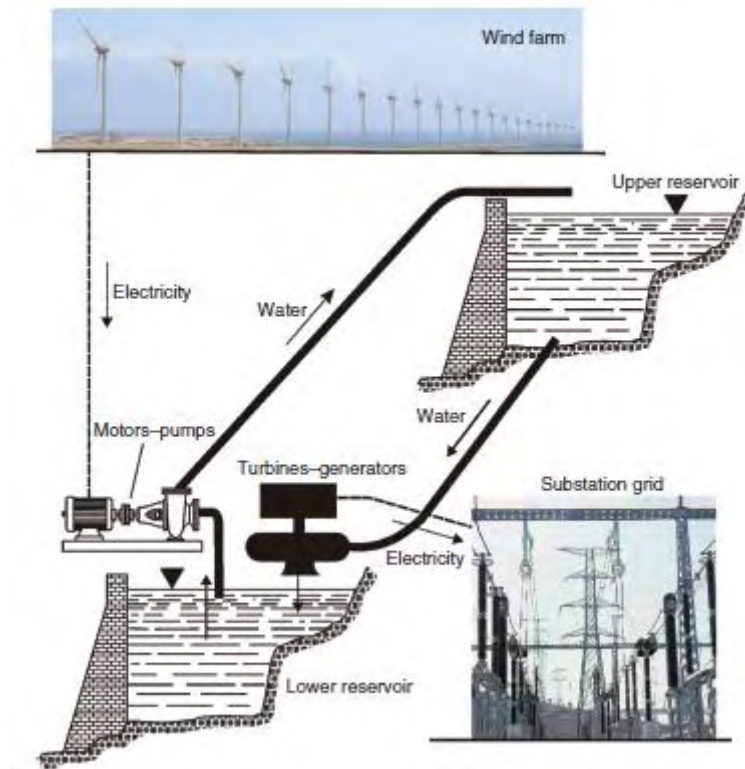
Ένα από τα πλεονεκτήματα της προσθήκης συσκευών αποθήκευσης ενέργειας είναι ότι συντελούν και στην εξισορρόπηση της παροχής αιολικής ενέργειας, με την απαιτούμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας [\[24\]](#). Ωστόσο, η αποθήκευση ενέργειας συνεπάγεται πρόσθετο κόστος όχι μόνο για την εγκατάσταση των απαραίτητων συσκευών αλλά και για τις απώλειες που συμβαίνουν κατά τη διαδικασία μετασχηματισμού της ενέργειας.

Μέχρι σήμερα έχουν επιτευχθεί μέτρια επίπεδα διείσδυσης αιολικής ενέργειας σε διασυνδεδεμένα δίκτυα, χωρίς την χρήση συστημάτων αποθήκευσης για την εξισορρόπηση των μεταβολών ισχύος των αιολικών πάρκων. Ορισμένες μελέτες συμπεραίνουν ότι με τη χρήση των συστημάτων παραγωγής, η υψηλή διείσδυση της αιολικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με χαμηλότερο οικονομικό κόστος απ ό τι εάν τα συστήματα αποθήκευσης ήταν ενσωματωμένα. Ωστόσο, εάν τα επίπεδα διείσδυσης ανέμου αυξηθούν σε πολύ μεγάλο βαθμό, τότε η ανάγκη για αποθήκευση της ενέργειας κρίνεται απαραίτητη.

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι αποθήκευσης της ενέργειας. Μερικές από αυτές περιλαμβάνουν μόλυβδο-οξύ, νικέλιο-κάδμιο, νάτριο-θείο, μπαταρίες ροής, σφονδύλους, υπερπυκνωτές και μαγνητικούς υπεραγωγούς. Ευρέως προτεινόμενοι μέθοδοι αποτελούν η Αντλούμενη Υδροηλεκτρική Αποθήκευση (Pumped Hydro Storage - PHS) και η Αποθήκευση Ενέργειας Συμπιεσμένου Αέρα (Compressed Air Energy Storage - CAES). Θεωρείται ότι οι PHS και CAES παρέχουν περισσότερη ισχύ και αποθηκεύουν περισσότερη ενέργεια με μεγαλύτερη αποδοτικότητα και με χαμηλότερο κόστος σε σχέση με άλλες μεθόδους.

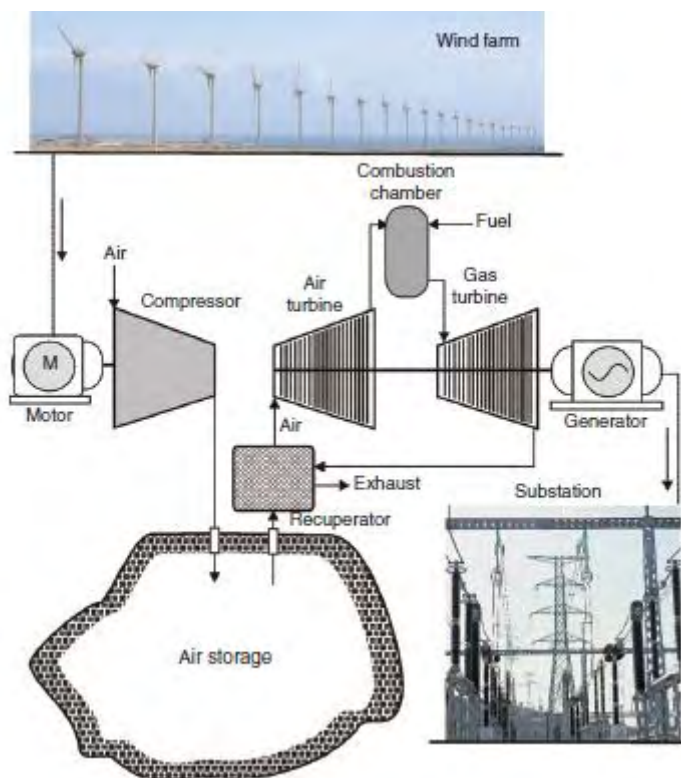
Τα συστήματα PHS έχουν εγκατασταθεί σε πολλά μέρη του κόσμου και χρησιμοποιούν την “υπερβολική” παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, έτσι ώστε να αντλήσουν νερό σε μια δεξαμενή που βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο ύψος. Αυτό το νερό ανακτάται μεταγενέστερα όταν απαιτείται μέσω μιας γεννήτριας, η οποία είναι συνδεδεμένη σε μια μονάδα παραγωγής ([Εικόνα 7.5](#)). Πολλά από αυτά τα συστήματα κατασκευάστηκαν

λόγω της μεγάλης αύξησης της παραγωγής πυρηνικής ενέργειας που σημειώθηκε μεταξύ της δεκαετίας του 1960 και της δεκαετίας του 1980.



Εικόνα 7.5: Σχηματικό διάγραμμα ενός υδροηλεκτρικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με αντλία PHS.

Τα συστήματα CAES χρησιμοποιούν το πλεόνασμα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τα αιολικά πάρκα για την λειτουργία αεροσυμπιεστών που συμπιέζουν και αποθηκεύουν αέρα σε δεξαμενές [Εικόνα 7.6](#)). Όταν απαιτείται, ο συμπιεσμένος αέρας ανακτάται για να θέσει σε λειτουργία έναν κινητήρα φυσικού αερίου, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με μια ηλεκτρική γεννήτρια που παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Αυτοί οι γεννήτριες λειτουργούν με φυσικό αέριο, αλλά μπορούν να χρησιμοποιήσουν και αεριοποιημένα βιοκαύσιμα για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.



Εικόνα 7.6: Σχηματικό διάγραμμα ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής CAES

7.10 Επιπτώσεις της Αιολικής Ενέργειας στα Δίκτυα Μεταφοράς και Διανομής Ισχύος

Εκτός από τις διαφορές μεταξύ των συμβατικών και αιολικών τεχνολογιών που έχουν ήδη αναφερθεί, υπάρχει και μία άλλη σημαντική διαφορά που σχετίζεται με την τοποθεσία των συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Η τοποθέτηση των εγκαταστάσεων είναι σημαντική για τους συμβατικούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς ωστόσο, δεν αποτελεί αναπόσπαστο παράγοντα για τη λειτουργία τους. Η λειτουργία των αιολικών πάρκων από την άλλη, εξαρτάται πλήρως από την τοποθεσία εγκατάστασης τους. Οι καταλληλότερες τοποθεσίες για την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου είναι αρκετά απομακρυσμένες από τα συμβατικά κέντρα ενέργειας και από περιοχές μεγάλης κατανάλωσης. Οι άνθρωποι συνήθως δεν θέλουν να ζουν σε κοντά σε περιοχές όπου μπορεί να υπάρχει θόρυβος λόγω των ανεμογεννητριών και παραμόρφωση του τοπίου.

Υπάρχουν ορισμένες προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται για την κατάλληλη επιλογή τοποθεσίας ενός αιολικού πάρκου. Αυτές περιλαμβάνουν την έρευνα για την συμπεριφορά του ανέμου κατά την διάρκεια του έτους, καθώς και μια ανάλυση για τυχόν περιορισμούς στην ικανότητα μεταφοράς των ηλεκτρικών δικτύων στην περιοχή εκείνη. Ιδιαίτερα

σημαντικό ζήτημα αποτελεί και η εκμετάλλευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Στα υπεράκτια αιολικά πάρκα η κατασκευή νέων γραμμών για τη μεταφορά ενέργειας κρίνεται απολύτως απαραίτητη, ενώ τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και οι σημαντικές ποσότητες ενέργειας που μεταφέρονται αποτελούν σημαντικές προκλήσεις κατά το σχεδιασμό των εσωτερικών ηλεκτρικών συστημάτων και των συστημάτων μεταφοράς και διανομής.

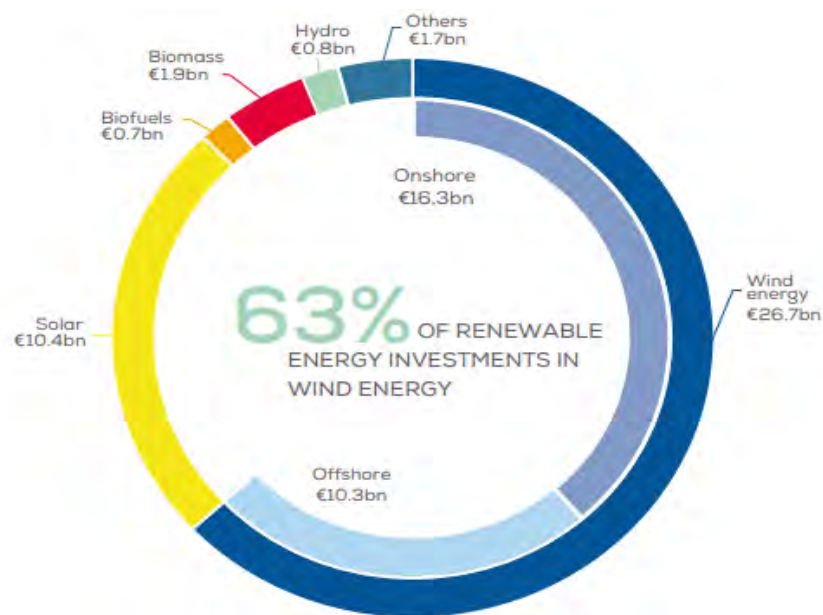
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

ΟΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

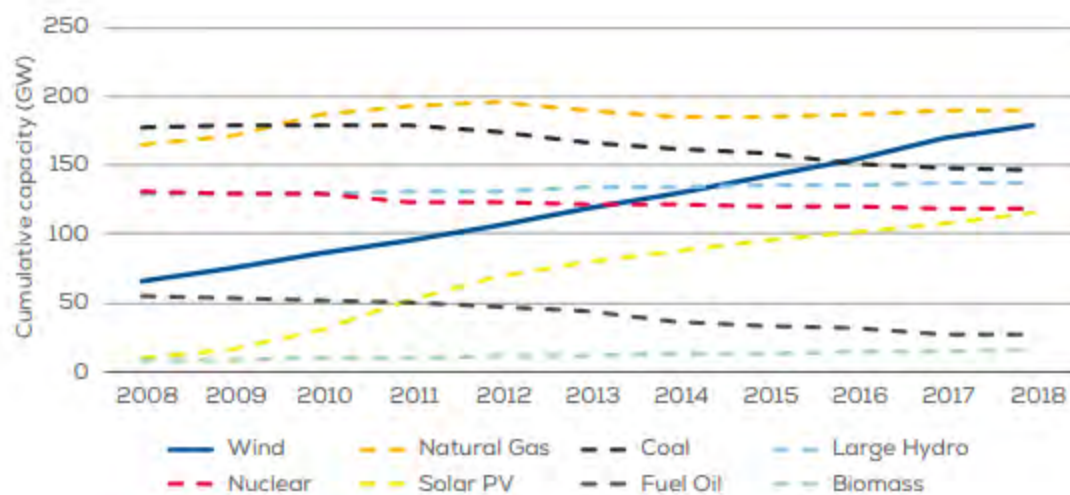
8.1 Εισαγωγή

Στο παρελθόν οι ανεμογεννήτριες προορίζονταν για να παρέχουν μόνο ένα μικρό μέρος της συνολικής παραγωγής, καθώς ήταν σχεδιασμένες ως παθητικά στοιχεία, γεγονός που σήμαινε ότι όταν ένα σύστημα ελέγχου των ανεμογεννητριών ανίχνευε ότι η τάση του δικτύου ή η συχνότητα του, ήταν εκτός του επιτρεπόμενου εύρους τιμών, η ανεμογεννήτρια θα σταματούσε την λειτουργία της και θα αποκοβόταν από το δίκτυο [25]. Όταν υπήρχαν μεγάλες ποσότητες αιολικής ενέργειας στο δίκτυο, οι γεννήτριες δεν μπορούσαν να μείνουν συνδεδεμένες στο δίκτυο καθώς υπήρχε ο κίνδυνος να επιδεινωθεί το αρχικό πρόβλημα αστάθειας.

Με την συνεχή αύξηση του ποσοστού διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Εικόνα 8.1) και πιο συγκεκριμένα της αιολικής ενέργειας, ιδιαίτερα την τελευταία δεκαετία (Εικόνα 8.2) δημιουργήθηκε η ανάγκη, οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες να σχεδιάζονται ως ενεργά στοιχεία του δικτύου τα οποία συμβάλλουν στη σταθεροποίηση του σε περίπτωση ύπαρξης σφαλμάτων. Συνεπώς προκύπτει η ανάγκη για έλεγχο της αέργου ισχύος, της τάσης, της συχνότητας καθώς και άλλων χαρακτηριστικών. Ωστόσο, η προσπάθεια αυτή οδηγεί και σε επιπλέον κόστη.



Εικόνα 8.1: Επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας το 2018 (€ δισ.) [26].



Εικόνα 8.2: Αθροιστική χωρητικότητα των συμβατικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση για τα έτη 2008-2018 [26].

8.2 Παροχή Ισχύος με Σκοπό την Αντιμετώπιση της Διακύμανσης της Αιολικής Ενέργειας και της Εξισορρόπησης της Ζήτησης

Οι διακυμάνσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες για χρονικό διάστημα λίγων λεπτών δεν αποτελούν ιδιαίτερα αποτρεπτικό παράγοντα για εγκατάσταση αιολικής ενέργειας στο δίκτυο. Ωστόσο, μπορεί να υπάρξουν διακυμάνσεις που μπορεί να διαρκέσουν ακόμα και αρκετές ώρες. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να μπορεί να γίνει παροχή ενέργειας με άλλα μέσα κάθε χρονική στιγμή.

Το κόστος παραγωγής για την εξισορρόπηση της ζήτησης εξαρτάται τόσο από τον τύπο του εξοπλισμού παραγωγής που είναι διαθέσιμος στο δίκτυο όσο και από την πρόβλεψη της καθαρής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή της συνολικής ζήτησης μείον την παραγωγή της αιολικής ενέργειας [25]. Όσο καλύτερα έχουν προβλεφθεί οι καθαρές ανάγκες, τόσο ευκολότερο θα είναι να προγραμματιστεί η χρήση των αντίστοιχων μονάδων παραγωγής και να χρησιμοποιηθούν οι λιγότερο δαπανηρές από αυτές.

Η παραγωγή της αιολικής ενέργειας μπορεί να προβλεφθεί με αξιοπιστία μόνο για λίγες ώρες, οπότε η διαδικασία προγραμματισμού μπορεί να γίνει ευκολότερη και το κόστος για την ενέργεια που απαιτείται με σκοπό να υπάρξει εξισορρόπηση να μειωθεί. Υπάρχουν πολλές εμπορικές εφαρμογές πρόβλεψης της παραγωγής αιολικής ενέργειας που διατίθενται στην αγορά και σε συνδυασμό με μια βελτιωμένη μετεωρολογική ανάλυση, οδηγούν σε προβλέψεις με αρκετά μεγάλο ποσοστό ακρίβειας.

8.3 Παράγοντες που Συντελούν στην Εξισορρόπηση της Προσφοράς και της Ζήτησης

Υπάρχουν επιπλέον παράγοντες που συντελούν στην εξισορρόπηση του ενεργειακού ισοζυγίου σε ένα σύστημα όπως:

- Το επίπεδο διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στο σύστημα, καθώς και οι διακυμάνσεις του φορτίου.
- Γεωγραφικές πτυχές, όπως το μέγεθος της περιοχής όπου πρέπει να υπάρξει εξισορρόπηση του ενεργειακού ισοζυγίου, η γεωγραφική εξάπλωση του ανέμου και η συγκέντρωση της ενέργειας από τις τοποθεσίες παραγωγής.
- Ο τύπος και το οριακό κόστος των εφεδρικών εργοστασίων παραγωγής ενέργειας (π.χ. ορυκτά, υδροηλεκτρικά).

- Το κόστος και τα χαρακτηριστικά άλλων μέτρων που συντελούν στην εξισορρόπηση του ενεργειακού ισοζυγίου, όπως η αποθήκευση ενέργειας.
- Η δυνατότητα ανταλλαγής ισχύος με γειτονικές χώρες.

8.4 Πρόσθετα Κόστη για τις Ανάγκες του Δικτύου

Οι συνέπειες της προσθήκης αιολικής ενέργειας στο δίκτυο διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Οι αναλύσεις για τον προσδιορισμό του κόστους βασίζονται στην διενέργεια προσομοιώσεων για τα εθνικά δίκτυα μεταφοράς και διανομής, με διαφορετικά σενάρια για την ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας υπάρχουσες και μελλοντικές τοποθεσίες.

Φαίνεται ότι τα κόστη πρόσθετης επέκτασης του δικτύου κυμαίνονται από 0,1 έως 5 €/MWh [\[25\]](#). Όσον αφορά τα πρόσθετα κόστη για την εξισορρόπηση του ενεργειακού ισοζυγίου, το κόστος του εκάστοτε δικτύου αυξάνεται ανάλογα με το ποσοστό διείσδυσης του ανέμου. Τα έξοδα υποδομής του δικτύου φαίνεται να κυμαίνονται περίπου στο ίδιο επίπεδο με τα πρόσθετα κόστη εξισορρόπησης.

Το κόστος ενίσχυσης του δικτύου λόγω της διείσδυσης αιολικής ενέργειας δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια, καθώς οι συνθήκες ποικίλλουν σημαντικά από χώρα σε χώρα. Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό, ότι οι υποδομές για μεταφορά και διανομή θα πρέπει να ενισχυθούν σημαντικά στις περισσότερες χώρες της ΕΕ και ιδιαίτερα όταν συνδέονται στο δίκτυο μεγάλες ποσότητες αιολικής ενέργειας. Το δίκτυο δεν έχει την δυνατότητα με τα τωρινά δεδομένα να αξιοποιήσει πλήρως την χωρητικότητα η οποία παράγεται από τα αιολικά πάρκα και τα ισχύοντα πρότυπα για τις γραμμές μεταφοράς, εξακολουθούν να βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε αυτά που υπήρχαν πριν να γίνει η διείσδυση της αιολικής ενέργειας στο δίκτυο.

Στο πλαίσιο μιας στρατηγικής πολιτικής σε ευρωπαϊκό επίπεδο, για μακροπρόθεσμη μεγάλης κλίμακας ενσωμάτωση του δικτύου, ο ιδιοκτησιακός διαχωρισμός μεταξύ παραγωγής και μεταφοράς είναι απαραίτητος. Ένα ακριβές πλάνο για τον τρόπο των διασυνδέσεων μεταξύ του ίδιου του αιολικού πάρκου και της εξωτερικής υποδομής του δικτύου πρέπει να εκπονείται, ιδίως για απομακρυσμένα αιολικά πάρκα και την υπεράκτια αιολική ενέργεια.

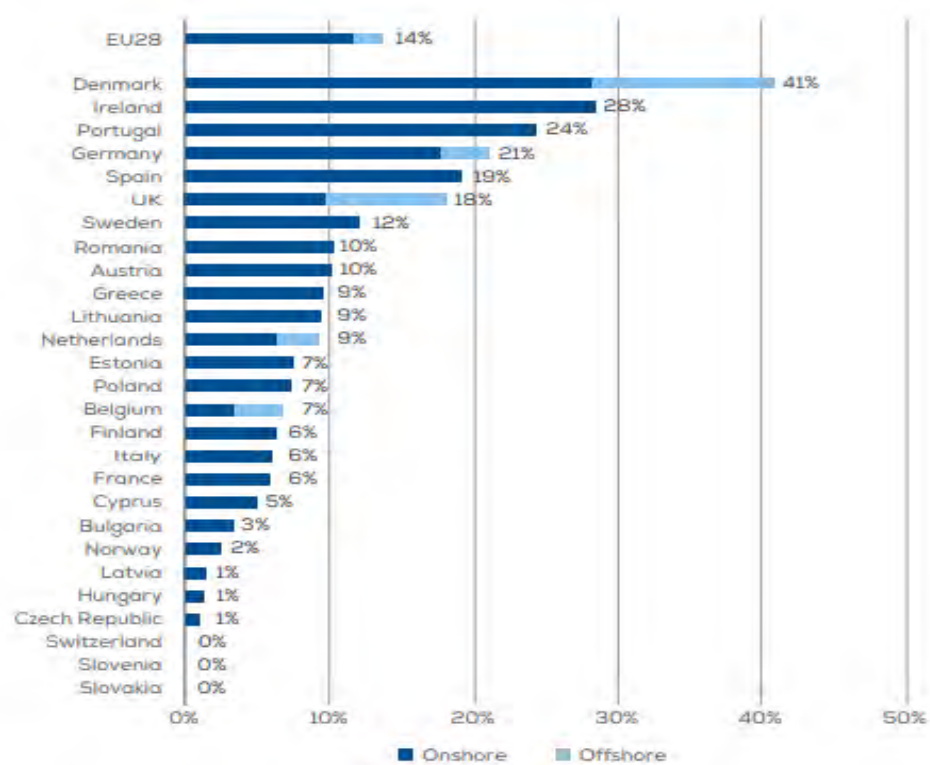
8.5 Αγορές Ενέργειας

Στο πλαίσιο της σταδιακής απελευθέρωσης της βιομηχανίας του ηλεκτρισμού στην Ευρωπαϊκή Ένωση, οι αγορές ενέργειας είναι όλο και περισσότερο οργανωμένες με παρόμοιο τρόπο ιδιαίτερα σε χώρες όπως η Γαλλία, η Γερμανία και η Δανία λόγω του μεγάλου ποσοστού της απελευθέρωσης της αγοράς. Σε όλες αυτές τις χώρες είναι κοινή η ύπαρξη τεσσάρων τύπων αγοράς ενέργειας [\[25\]](#):

1. Διμερής αγορά ηλεκτρικής ενέργειας: Η διαπραγμάτευση πραγματοποιείται διμερώς και τα κόστη και οι ποσότητες δεν δημοσιοποιούνται.
2. Η αγορά της επόμενης ημέρας: Μια αγορά στην οποία τα κόστη και οι ποσότητες βασίζονται στην προσφορά και την ζήτηση. Τα τελικά κόστη και οι ποσότητες που προκύπτουν αποτελούν αντικείμενο διαπραγμάτευσης και δημοσιοποιούνται. Στην “Αγορά της επόμενης ημέρας”, η υποβολή προσφορών λήγει το μεσημέρι και αφορά τις επόμενες 24 ώρες.
3. Η ενδοημερήσια αγορά: Έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με την “Αγορά της επόμενης ημέρας”, με την μόνη διαφορά ότι οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να κάνουν συνεχώς προσφορές κατά την διάρκεια της ημέρας, ανά μια ώρα.
4. Η αγορά εξισορρόπησης: Η αγορά αυτή χειρίζεται τις καταγραφόμενες ανισορροπίες των συμμετεχόντων κατά τη διάρκεια της προηγούμενης 24ωρης περιόδου λειτουργίας και ενεργεί μόνο από την πλευρά της προσφοράς για να διευθετήσει τις ανισορροπίες.

8.6 Το Παράδειγμα της Δανίας

Το 2018 περίπου το 41% της εγχώριας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της Δανίας προερχόταν από την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, γεγονός που είχε αναδείξει την Δανία στην κορυφαία χώρα στην Ευρωπαϊκή Ένωση ([Εικόνα 8.3](#)), όσον αφορά τη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Από τα 5.750 MW, όπου ήταν η ετήσια παραγωγή, τα 4000 MW προέρχονταν από τα χερσαία αιολικά πάρκα ενώ τα 1750 MW από τα υπεράκτια.



Εικόνα 8.3: Ποσοστό της μέσης ετήσιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας που καλύπτεται από την αιολική ενέργεια στην Ευρωπαϊκή Ένωση [26].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η σταδιακή αύξηση της παραγόμενης χωρητικότητας από την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, έχει ως αποτέλεσμα την όλο και μεγαλύτερη απεμπλοκή από τις συμβατικές μορφές ενέργειας. Παράλληλα, η τεχνολογική πρόοδος στον τομέα των ανεμογεννητριών επιτρέπει την χρήση προηγμένων συστημάτων ελέγχου με σκοπό τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων που προκύπτουν από την διείσδυση της αιολικής ενέργειας στη λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος.

Είναι προφανές λοιπόν, ότι διαμορφώνονται όλες οι απαραίτητες προϋποθέσεις για να την κατασκευή νέων αιολικών πάρκων και για περαιτέρω αύξηση της παραγόμενης χωρητικότητας από την εκμετάλλευση αιολικής ενέργειας.

Ιδιαίτερα, για την κατηγορία των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, όπου οι συνθήκες είναι ευνοϊκότερες, λόγω των τεράστιων ποσοτήτων αέρα που υπάρχουν αλλά και της δυνατότητας της αποκεντροποιημένης παραγωγής, το μέλλον φαντάζει εξαιρετικά ευοίωνο και με πολλαπλά οφέλη τόσο για τους καταναλωτές, όσο και για τους παραγωγούς αιολικής ενέργειας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] DT Swift-Hook, “History of Wind Power- Comprehensive Renewable Energy”, 2012.
- [2] Jos Beurskens, “The History of Wind Energy”, 2014.
- [3] Thomas Ackermann, “Wind Power in Power Systems”, 2005, pp. 57-74.
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_wind_power
- [5] Spenser Anderson, “Comparing Offshore and Onshore Wind”, 2013.
- [6] <https://www.nesgt.com/blog/2019/07/offshore-and-onshore-wind-farms>
- [7] <https://www.iea.org/tcep/power/renewables/onshorewind>
- [8] <https://www.worldatlas.com/articles/the-10-largest-wind-farms.html>
- [9] <https://www.iea.org/tcep/power/renewables/offshorewind>
- [10] <https://www.worldatlas.com/articles/the-10-largest-offshore-wind-farms-in-the-world.html>
- [11] <https://www.windpowerengineering.com/vertical-axis-wind-turbines-vs-horizontal-axis-wind-turbines>
- [12] Dafrose Camille M. Bajaro, “Horizontal and Vertical Axis Wind Turbines”, 2011.
- [13] M. Ragheb, “Components of wind machines”, 2014.
- [14] Zhe Chen, Senior Member IEEE, Josep M. Guerrero, Senior Member IEEE, and Frede Blaabjerg, Fellow IEEE, “A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines”, 2009.
- [15] A.D. Wright and L.J. Fingersh, “Advanced Control Design for Wind Turbines Part I: Control Design, Implementation, and Initial Tests”, 2008, pp. 6-57.
- [16] Hongzhong Ma, Lin Chen, Ping Ju, Haihua Liu, Ning Jiang and Chunling Wang, “Feasibility Research on DC Generator Based Wind Power Generation System”, 2009.

- [17] Johannes H. J. Potgieter, Student Member, IEEE, and Maarten J. Kamper, Senior Member, IEEE, “Design of New Concept Direct Grid-Connected Slip-Synchronous Permanent-Magnet Wind Generator”, 2012.
- [18] Min Zhang, Wei Wang, Y. R. Chen, and Tim Coombs “Design Methodology of HTS Bulk Machine for Direct-Driven Wind Generation”, 2012.
- [19] M. Tazil, V. Kumar, R.C. Bansal, S. Kong, Z.Y. Dong, W. Freitas, H.D. Mathur, “Three-phase doubly fed induction generators: an overview”, 2009.
- [20] Siegfried Heier, “Grid integration of wind energy onshore and offshore conversion systems”, 2014, pp. 228 -364.
- [21] Ali Sayigh, “Comprehensive Renewable Energy”, 2012, pp 1347-1431.
- [22] Gregor Giebel, “A Variance Analysis of the Capacity Displaced by Wind Energy in Europe”, 2006.
- [23] Torbjörn Thiringer, Tomas Petru, and Stefan Lundberg, “Flicker Contribution From Wind Turbine Installations”, IEEE transactions on energy conversion, vol. 19, no. 1, 2004.
- [24] Ming-Shun Lu, Chung-Liang Chang, Senior Member IEEE, Wei-Jen Lee, Fellow IEEE, and Li Wang, Senior Member IEEE “Combining the Wind Power Generation System With Energy Storage Equipment”, 2009.
- [25] Søren Krohn, Poul-Erik Morthorst, Shimon Awerbuch, “The Economics of Wind Energy - A report by the European Wind Energy Association”, 2009, pp. 91-110.
- [26] Wind energy in Europe in 2018 - Trends and statistics, 2019.